BIBLIOTECA DE
DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

muy
INTERESANTE

Richard Dawkins

EL RELOJERO CIEGO

RBA
EDITORES

Dirección científica:
Jaume Josa Llorca
Profesor de Historia de las Ciencias Naturales de la Facultad de Biología de la Universidad de Barcelona
Colaborador científico del Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Associatedship of Chelsea College (University of London)

Autores de la biografía y la presentación:
Pilar Zueras
Néstor Navarrete

Autor de la traducción y adaptación:
Manuel Arroyo Fernández

Título original:
The Blind Watchmaker

Título en español:
El relojero ciego

© Richard Dawkins, 1986
Publicado por Longman Scientific & Technical, Longman Group UK Limited
© Editorial Labor, S. A., 1988 (Barcelona)
Grupo Telepublicaciones
© RBA Editores, S. A., 1993, por esta edición
Pérez Galdós, 36 bis, 08012 Barcelona

ISBN (Obra completa): 84-473-0174-5
ISBN: 84-473-0246-6
Depósito Legal: B-33.571-1993
Impresión y encuadernación: CAYFOSA, Ctra. de Caldes, km 3.
Sta. Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Impreso en España - Printed in Spain

Richard Dawkins

1941 Nace el 26 de marzo en Nairobi, Kenia.

1966 Obtiene el doctorado en Zoología por el Balliol College de Oxford, después de haber colaborado con Nikolaas Tinbergen, uno de los fundadores de la moderna Etología.

1967 Se traslada a Estados Unidos para desempeñar el cargo de profesor adjunto de Zoología en la Universidad de California, en Berkeley.

1970 De regreso a Gran Bretaña, accede a la cátedra de Zoología de la Universidad de Oxford y es designado miembro de la junta de gobierno del New College.

1974 Dirige la edición de *Animal behaviour*.

1976 Publica *The selfish gene (El gen egoísta)*, donde divulga desde una amplia panorámica interdisciplinaria la obra de investigadores como Darwin, Mendel, Fisher, Hamilton, Williams y Maynard Smith.

1979 En colaboración con J. R. Krebs, publica «Arms races between and within species» (en *Proceedings of the Royal Society of London*).

1982 Publica *The extended phenotype: The gene as the unit of selection*.

1983 Dirige la edición de *Oxford surveys and evolutionary biology*.

1985 Es presentador del programa televisivo *Horizon*, de la B.B.C.

1986 Publica *The blind watchmaker (El relojero ciego)*.

1988 Obtiene las cátedras Gifford en la Universidad de Glasgow y Sidgwick en el Newnham College de Cambridge. Es nombrado miembro de honor del Regent's College de Londres.

1989 Recibe la medalla de plata de la Zoological Society de Londres.

1990 Ocupa la cátedra Nelson de la Universidad de California. La Royal Society de Londres le otorga el Premio Michael Faraday.

El relojero ciego

Algunas teorías de la ciencia, como el darwinismo, al ser presentadas al resto de la comunidad científica y al público en general, han despertado controversias y, en algunos casos, oposiciones viscerales que serían impensables en otros aspectos de la cultura humana. Cuando apareció formulada la teoría de la evolución de las especies por selección natural, hace ya casi ciento cincuenta años, muchas personas, en efecto, reaccionaron airadamente porque creían ver en ella una terrible amenaza para su fe religiosa. La comunidad científica fue más cauta y se dividió entre quienes se adhirieron con entusiasmo a lo que proponía Darwin y quienes mostraron un marcado escepticismo conservador. Los años fueron acumulando pruebas; poco a poco los escépticos cedieron y la Biología experimentó el gran avance que conocemos en la actualidad, pero entre el público no especializado quedaron círculos muy amplios en los que todavía la obra de Darwin, y el evolucionismo que de ella se deriva, es objeto de amplio debate y de ásperas controversias.

Este libro deshace una buena parte de esos equívocos que normalmente se proyectan sobre el evolucionismo; y sobre todo es un intento serio de explicar basándose en la teoría de Darwin cómo han podido llegar a existir formas de vida tan increíblemente complejas como nosotros mismos, a partir de los más simples materiales.

La complejidad del diseño

La inusitada habilidad que han desarrollado los murciélagos en la utilización de los ecos producidos por los ultrasonidos que ellos mismos emiten sirve a Richard Dawkins para ejemplificar el extraordinario grado de sofisticación que han alcanzado los órganos de los seres vivos. Para Dawkins, tal complejidad de diseño no puede explicarse apelando simplemente al azar, ya que éste es sólo un elemento, y ni siquiera central, de la teoría darwiniana. En realidad, lo que fundamenta a ésta es la idea de la *selección cumulativa* en la que cada mejora, aunque sea mínima, constituye la base para una etapa posterior. Sirviéndose de la analogía que le proporcionan las bioformas producidas por un programa informático, el autor analiza la importancia que llegan a adquirir, con el paso de las generaciones, los pequeños cambios acumulados y aclara que la evolución no tiene una finalidad a largo plazo, y es porque la selección natural cumulativa se comporta como «un relojero ciego».

El código genético

Uno de los argumentos preferidos por los antievolucionistas es el de que un órgano, por ejemplo un ojo, sólo es útil cuando está totalmente desarrollado, pero representa una desventaja en las fases intermedias de su evolución. Dawkins demuestra que es mejor ver un poco y mal, que no ver nada. De hecho, entre las especies actuales existen numerosos ejemplos de órganos «a medio hacer», o chapuceramente terminados, según el criterio de un diseñador exigente, que sin embargo representan una ventaja evidente para sus poseedores en la lucha por la supervivencia. El análisis detallado de cómo funciona la inscripción, conservación y modificación de la información contenida en las moléculas del ADN de todos los seres vivos proporciona una valiosa información sobre la manera gradual con que se producen los cambios que finalmente conducirán a la aparación de razas y especies nuevas.

Las dificultades de la clasificación

Los intentos de clasificar las especies vivas son muy antiguos, pero muchos de esos sistemas clasificatorios fueron fracasando a medida que aumentaba la cantidad de las especies conocidas. Los sistemas que no cayeron en desuso se encontraron, no obstante, en serios aprietos al intentar clasificar las numerosas especies extinguidas que han dejado restos fosilizados. No ha ocurrido así con la *taxonomía cladística* que, basada en las relaciones evolutivas, clasifica las especies según la cercanía de su parentesco, de manera que todos aquellos organismos que tienen un antepasado cercano común se convierten en ramas de un mismo tronco. Descendiendo por el árbol, se encontraría un antepasado común a todos los seres vivos que existen o existieron alguna vez. Dawkins encuentra la prueba de la existencia de dicho antepasado en la universalidad del código genético. La Biología molecular abre así la puerta para confeccionar un sistema taxonómico completo, basado en las similitudes y diferencias entre los genes de todas las especies. Finalmente, Dawkins rebate uno por uno los argumentos de las escuelas biológicas que se oponen al darwinismo, apoyándose fundamentalmente en la Embriología y en la Genética.

Otros libros de la colección relacionados con el tema

El anillo del rey Salomón de K. Lorenz
La vida a prueba de D. Attenborough
El mono desnudo de D. Morris

Richard Dawkins

EL RELOJERO CIEGO

A mis padres

PREFACIO

Este libro está escrito con la convicción de que nuestra propia existencia, presentada alguna vez como el mayor de todos los misterios, ha dejado de serlo, porque el misterio está resuelto. Lo resolvieron Darwin y Wallace, aunque todavía continuaremos añadiendo observaciones a esta solución, durante algún tiempo. Escribí este libro porque me sorprendió la cantidad de gente que no sólo parecía ignorar esta elegante y bella solución a un problema tan profundo, sino que en muchos casos ignoraban, realmente, que hubiese un problema.

Se trata de un problema de complejidad de diseño. El ordenador con el que estoy escribiendo estas palabras tiene una capacidad de almacenamiento de unos 64 Kb (un byte es la unidad que se utiliza para almacenar cada carácter de un texto). El ordenador fue diseñado de una manera consciente, y fabricado deliberadamente. El cerebro con el que se están comprendiendo mis palabras es un conjunto de unos diez millones de kiloneuronas. Muchas, entre estos miles de millones de células nerviosas, tienen más de mil «cables eléctricos» cada una, que las conectan con otras neuronas. A nivel genético molecular, cada célula somática, de las más de un billón existentes, contiene una información digital, meticulosamente ordenada, unas mil veces mayor que la de mi ordenador. La complejidad de los organismos vivos va pareja con la elegante eficiencia de su diseño aparente. Si alguien no está de acuerdo con que este diseño tan complejo pide a gritos una explicación, me rindo. Pero no, pensándolo bien, no me rindo, porque una de las finalidades de este libro es la de transmitir algunas de las verdaderas maravillas de la complejidad biológica a aquellos cuyos ojos no han sido abiertos a las mismas. En todo caso, después de haber creado un misterio, otra finalidad importante consiste en eliminarlo, explicando la solución.

Explicar es un arte difícil. Se puede explicar algo de forma que el lector comprenda las palabras, o de forma que el lector lo sienta en la médula de sus huesos. Para hacer esto último, a veces no es suficiente presentar la evidencia ante el lector de una manera desapasionada. Hay que transformarse en abogado y utilizar los trucos de la abogacía. Este libro no es un tratado científico desapasionado. Otros libros sobre el darwinismo lo son, muchos de ellos excelentes e informativos, y deberían leerse juntamente con éste. Lejos de ser desapasionado, tengo que confesar que algunas partes de este libro están escritas con una pasión que, en una revista científica profesional, podría provocar comentarios. Por supuesto, se trata de informar pero también se trata de persuadir e incluso –se puede decir el propósito sin presunción– inspirar. Quiero inspirar al lector una visión de nuestra propia existencia, confrontada como un misterio escalofriante, y transmitirle, simultáneamente, toda la excitación del hecho de que se trata de un misterio con una solución elegante a nuestro alcance. Además, quiero persuadir al lector, no sólo de que la visión darwiniana del mundo es cierta, sino de que es la única teoría conocida que, en principio, *podría* resolver el misterio de nuestra existencia. Esto la convierte en una teoría doblemente satisfactoria. Un buen planteamiento podría ser que el darwinismo fuese cierto no sólo en este planeta sino en todos los del universo en los que pudiera hallarse vida.

Hay un aspecto que me separa de los abogados profesionales. A un abogado o a un político se les paga para que ejerciten su pasión o persuasión en nombre de un cliente o de una causa en la cual puede que no crean en privado. Yo nunca he hecho esto ni lo haré. Puede que no siempre esté en lo cierto pero me preocupo intensamente de lo que es verdad y nunca digo algo que no crea que sea cierto. Recuerdo haber quedado impresionado durante una visita a una asociación universitaria para discutir con unos creacionistas. En la cena, después del debate, estaba sentado junto a una mujer joven, que había pronunciado un discurso más o menos apasionado en favor del creacionismo. Era obvio que no podía *ser* una creacionista, por lo que le pedí que me dijera honestamente por qué lo había hecho. Admitió que, simplemente, estaba practicando su habilidad en el debate, y encontró más desafiante defender una posición en la que no creía. Al parecer, es una práctica frecuente de estas asociaciones universitarias *decir* a los oradores de qué lado tienen que estar. Sus propias creencias no entran en juego. He recorrido un largo camino para realizar la desagradable tarea de hablar en público, porque creo en la veracidad del tema que se me pide que defienda. Cuando descubrí que los miembros de esa

sociedad utilizaban un tema como vehículo para practicar juegos de palabras, decidí rechazar futuras invitaciones de esta clase de asociaciones que fomentan una defensa falsa de principios en los que está en juego una verdad científica.

Por razones que no tengo del todo claras, el darwinismo parece necesitar una defensa mayor que otras verdades establecidas de manera similar en otras ramas de la ciencia. Muchos de nosotros no comprendemos la teoría cuántica, o las teorías de Einstein sobre la relatividad general y especial, pero esto no nos lleva a *oponernos* a estas teorías. El darwinismo, a diferencia del «einsteinismo», aparece contemplado como un hermoso juego por aquellos críticos que muestran un cierto grado de ignorancia. Supongo que un problema con el darwinismo, como Jacques Monod observó con perspicacia, es que todo el mundo cree que lo comprende. Es, por supuesto, una teoría remarcadamente simple; bastante infantil, podría pensarse, en comparación con casi toda la física y las matemáticas. En esencia, equivale simplemente a la idea de que, donde hay posibilidades de que se produzcan variaciones hereditarias, la reproducción no aleatoria tiene consecuencias que pueden llegar lejos, si hay tiempo para que se acumulen. Aun así, tenemos buenos fundamentos para creer que esta simplicidad es decepcionante. No hay que olvidar que, aunque parezca una teoría simple, nadie pensó en ella hasta que lo hicieron Darwin y Wallace, a mediados del siglo XIX, casi trescientos años después de los *Principia* de Newton, y más de dos mil años después de la medición de la Tierra por Eratóstenes. ¿Cómo una idea tan simple pudo permanecer oculta para pensadores del calibre de Newton, Galileo, Descartes, Leibniz, Hume y Aristóteles? ¿Por qué tuvo que esperar a dos naturalistas de la época victoriana? ¿Dónde *se equivocaron* los filósofos y matemáticos que la pasaron por alto? Y ¿cómo una idea tan importante no ha sido absorbida todavía en amplios sectores de la conciencia popular?

Es casi como si el cerebro humano estuviese diseñado específicamente para no entender el darwinismo, o para encontrarlo difícil de creer. Tomemos, por ejemplo, el tema del «azar», dramatizado frecuentemente como el azar ciego. La mayoría de la gente que ataca el darwinismo se lanza con una vehemencia casi impropia hacia la idea errónea de que no hay otra cosa distinta del mero azar en esta teoría. Dado que la complejidad de los seres vivos encarna la antítesis total del azar, si se piensa esto del darwinismo, ¡resultará fácil refutarlo! Una de mis tareas consistirá en destruir este mito tan ampliamente extendido de que el darwinismo es una teoría de «azar». Otro aspecto por el que parecemos predispuestos a no creer en el darwinismo es que

nuestros cerebros están construidos para tratar sucesos *en escalas de tiempo* radicalmente diferentes a las que caracterizan los cambios evolutivos. Estamos equipados para apreciar procesos que tardan segundos, minutos, años o, como mucho, décadas en completarse. El darwinismo es una teoría de procesos acumulativos tan lentos que precisan entre miles y millones de décadas para completarse. Todos nuestros juicios intuitivos de lo que puede ser probable resultan erróneos en muchos órdenes de magnitud. Nuestro bien sintonizado aparato de escepticismo y teoría de la probabilidad subjetiva falla por un gran margen, porque está sintonizado —irónicamente, por la propia evolución— para trabajar dentro de una vida de unas pocas décadas. Se requiere un gran esfuerzo de imaginación para escapar de esta prisión de la escala de tiempo familiar, un esfuerzo en el que yo trataré de ayudar.

Un tercer aspecto en el que nuestros cerebros parecen estar predispuestos a resistirse al darwinismo proviene de nuestro gran éxito como diseñadores creativos. Nuestro mundo está dominado por proezas de ingeniería y obras de arte. Estamos acostumbrados a la idea de que la elegancia compleja indica un diseño artesanal premeditado. Ésta es, probablemente, la razón más poderosa de la creencia, mantenida por la mayoría de la gente, en algún tipo de deidad sobrenatural. Fue necesario un gran salto de la imaginación de Darwin y Wallace para ver que, en contraposición a toda intuición, hay otro camino que, una vez comprendido, constituye una manera mucho más plausible de que surja un «diseño» complejo partiendo de otro primitivo más simple. Un salto tan grande de la imaginación, que aún hoy en día mucha gente parece reacia a realizar. La finalidad principal de este libro es, pues, ayudar al lector a dar ese salto.

Los autores esperan, naturalmente, que sus libros tengan un impacto duradero mejor que efímero. Pero cualquier abogado, además de exponer su interminable parte del caso, debe responder también a sus colegas con puntos de vista opuestos o aparentemente opuestos. Existe el riesgo de que algunos de estos argumentos, a pesar de la vehemencia que puedan originar hoy día, parezcan terriblemente anticuados en las décadas venideras. Con frecuencia, se ha observado la paradoja de que la primera edición de *El origen de las especies* presentaba el argumento de una forma más clara que la sexta. Esto se debe a que Darwin se sintió obligado, en ediciones posteriores, a responder a las críticas de la primera edición, críticas que hoy parecen tan anticuadas que las respuestas se encuentran en el camino, e incluso en lugares fuera del mismo. Sin embargo, no hay que caer en la tentación de ignorar las críticas de los colegas que están de

moda y que uno sospecha que son prodigios pasajeros, por razones de cortesía no sólo hacia estos críticos sino también hacia sus, por otra parte, confusos lectores. Aunque tengo mis propias ideas sobre qué capítulos del libro demostrarán ser, por esta razón, eventualmente efímeros, el lector —y el tiempo— lo juzgarán.

Me preocupa ver que algunas amigas (afortunadamente no muchas) tratan el uso del pronombre impersonal masculino como si se mostrara intención de excluirlas. Si hubiese que hacer alguna exclusión (por suerte, no hay que hacerla), pienso que excluiría antes a los hombres, aunque cuando hice una vez una tentativa de referirme a mis lectores en abstracto como «ella», una feminista me denunció por fomentar la condescendencia: debería decir «el o ella», y «suyo o suya». Esto es fácil de hacer si a uno no le preocupa el lenguaje, y si esto sucede no merece tener lectores de ningún sexo. En este libro, he vuelto a las reglas convencionales de los pronombres. Puedo referirme al «lector» como «él», sin pensar que mis lectores sean específicamente masculinos más de lo que un orador francés piensa que una mesa es femenina. De hecho, creo que pienso con más frecuencia que mis lectores son mujeres, pero éste es un problema personal y no me gustaría que tales consideraciones interfirieran con la forma de utilizar mi lengua materna.

Personales también son algunas de mis razones de agradecimiento. Aquellos a los que no puedo hacer justicia lo comprenderán. Mis editores no vieron razones para ocultarme la identidad de sus árbitros (no de sus «críticos»; los verdaderos críticos *tienen el mismo aire* que muchos americanos por debajo de los cuarenta, y critican los libros sólo *después* de publicados, cuando ya es muy tarde para que el autor haga algo al respecto), por lo que me he beneficiado en gran parte de las sugerencias de John Krebs (otra vez), John Durant, Graham Cairns-Smith, Jeffrey Levinton, Michael Ruse, Anthony Hallam y David Pye. Richard Gregory criticó amablemente el capítulo 12, y la versión final se benefició con su completa desaparición. Mark Ridley y Alan Grafen, que ya no son mis estudiantes, incluso oficialmente, son, junto con Bill Hamilton, las lumbreras que encabezan el grupo de colegas con los que discuto sobre evolución y de cuyas ideas me beneficio casi a diario. Pamela Wells, Peter Atkins y John Dawkins han criticado positivamente varios capítulos. Sarah Bunney introdujo numerosas mejoras, y John Gribbin corrigió un error importante. Alan Grafen y Will Atkinson me aconsejaron sobre problemas de cálculo, y los componentes del Apple Macintosh Syndicate del Departamento de Zoología me permitieron amablemente dibujar bioformas en su impresora láser.

Una vez más me he beneficiado del dinamismo incansable con el que Michael Rodgers, ahora en Longman, lleva a cabo todo lo que se le pone por delante. Él y Mary Cunnane, de Norton, apretaron con habilidad el acelerador (a mi moral) y el freno (a mi sentido del humor) siempre que fue preciso. Escribí el libro durante un permiso sabático concedido amablemente por el Departamento de Zoología y el New College. Por último, una deuda que debería haber reconocido en mis dos libros anteriores: el sistema tutorial de Oxford y mis muchos alumnos de las tutorías en Zoología a lo largo de los años, me han ayudado a practicar las escasas habilidades que pueda tener en el difícil arte de explicar.

RICHARD DAWKINS

Oxford, 1986.

1. EXPLICAR LO MUY IMPROBABLE

Nosotros los animales somos las cosas más complejas del universo conocido. El universo que conocemos, por supuesto, es un pequeño fragmento del universo real. Puede haber objetos más complejos que nosotros en otros planetas, y es posible que algunos ya conozcan nuestra existencia. Pero esto no altera la idea que quiero desarrollar. Las cosas complejas merecen siempre una explicación muy especial. Queremos saber cómo empezaron a existir y por qué son tan complejas. Es probable que la explicación, como se discutirá más adelante, sea la misma en términos generales para todas las cosas complejas de cualquier lugar del universo; la misma para nosotros, que para los chimpancés, los gusanos, los robles y los monstruos del espacio exterior. Por contraposición, no es la misma para lo que llamaré cosas «simples», como rocas, nubes, ríos, galaxias y estrellas. Estas cosas son materia de la física. Los chimpancés, los perros, los murciélagos, las cucarachas, la gente, los gusanos, las flores, las bacterias y los seres de otras galaxias son materia de la biología.

La diferencia está en la complejidad del diseño. La biología es el estudio de las cosas complejas que dan la apariencia de haber sido diseñadas con un fin. La física es el estudio de las cosas simples que no nos incitan a invocar un diseño. A primera vista, los artefactos hechos por el hombre, como los ordenadores y los coches, parecen constituir excepciones. Son complejos y están, obviamente, diseñados con una finalidad, pero aun así no tienen vida y están hechos de metal y plástico en lugar de carne y hueso. En este libro serán tratados como objetos biológicos.

La reacción del lector puede consistir en preguntar: «Sí, pero ¿son realmente objetos biológicos?» Las palabras son nuestros

sirvientes, no nuestros amos. Por diferentes razones, encontramos conveniente utilizar palabras con distinto sentido. La mayoría de los libros de cocina clasifican la langosta como un pez. Los zoólogos podrían extrañarse bastante sobre este punto, y señalar que las langostas podrían llamar peces a los humanos con mayor justicia, ya que los peces son una especie más cercana a los humanos que a las langostas. Y, hablando de justicia y de langostas, he oído que un tribunal tuvo que decidir recientemente sobre si las langostas eran insectos o «animales» (el tema surgió al discutir si se debería permitir que la gente cociese vivas a las langostas). Desde un punto de vista zoológico, las langostas ciertamente no son insectos. Son animales, pero también lo son los insectos y lo somos nosotros. No tiene especial interés ponerse a discutir sobre la forma en que distintas personas utilizan las palabras (aunque en mi vida no profesional estoy bastante dispuesto a discutir con la gente que cuece las langostas vivas). Los cocineros y los abogados necesitan utilizar las palabras con un estilo propio especial, igual que yo en este libro. No importa si los coches y los ordenadores son «realmente» objetos biológicos. La idea es que si encontráramos cualquier cosa con este grado de complejidad en un planeta, no tendríamos duda en concluir que allí existiría vida, o que existió en algún momento. Las máquinas son productos directos de las cosas vivas, su complejidad y diseño se derivan de ellos, y son indicativas de la existencia de vida en un planeta. Esto mismo se aplica a los fósiles, esqueletos y cadáveres.

He mencionado que la física es el estudio de las cosas simples, lo cual, en principio, puede resultar extraño. La física parece un tema complejo porque sus ideas son difíciles de comprender. Nuestros cerebros fueron diseñados para comprender la caza y la recolección, el apareamiento y la reproducción: un mundo de objetos de tamaño medio moviéndose en tres dimensiones con una velocidad moderada. Estamos mal equipados para comprender lo muy pequeño y lo muy grande; cosas cuya duración se mide en picosegundos o en gigaaños; partículas que no tienen posición; fuerzas y campos que no podemos ver o tocar, que conocemos sólo porque afectan a las cosas que podemos ver o tocar. Pensamos que la física es compleja porque nos resulta difícil de entender y porque los libros de física están llenos de complejos cálculos matemáticos. Pero los objetos que estudian los físicos son básicamente, y a pesar de todo, objetos simples. Son nubes de gases o pequeñas partículas, o conjuntos de materia uniforme como los cristales, con patrones atómicos repetidos prácticamente de manera infinita. No tienen, de acuerdo con los patrones biológicos, partes complejas. Incluso los

grandes objetos físicos como las estrellas están formados por un conjunto de elementos bastante limitado, ordenados más o menos al azar. El comportamiento de los objetos físicos, no biológicos, es tan simple que es posible usar el lenguaje matemático existente para describirlo, y es por ello por lo que los libros de física están llenos de cálculos.

Los *libros* de física pueden ser complejos, pero al igual que los coches y los ordenadores, son producto de unos objetos biológicos: los cerebros humanos. Los objetos y fenómenos descritos en un libro de física son más simples que una sola célula del cuerpo de su autor. Y el autor está formado por billones de estas células, la mayoría de las cuales son diferentes entre sí, y se encuentran organizadas con una intrincada arquitectura y dirigidas con precisión, hasta formar una máquina capaz de escribir un libro. Nuestros cerebros no están mejor equipados para manejar complejidades extremas que para manejar tamaños extremos u otros problemas extremos de la física. Nadie ha podido hallar todavía los cálculos matemáticos para describir la estructura y el comportamiento de un objeto tal como un físico, o incluso una de sus células. Lo único que podemos hacer es tratar de comprender algunos de los principios generales sobre el funcionamiento de los seres vivos y el porqué de su existencia.

Aquí es donde empezamos. Queríamos saber por qué existimos nosotros y todas las demás cosas complejas. Podemos contestar ahora esta pregunta en términos generales, aun sin ser capaces de comprender los detalles de la propia complejidad. Para poner un ejemplo, la mayoría de nosotros no comprendemos cómo funciona un aeroplano. Probablemente, sus constructores tampoco lo entienden en su totalidad: los especialistas en motores no comprenden totalmente la problemática de las alas, y los especialistas en alas conocen los motores sólo de una forma vaga. Los especialistas en alas tampoco comprenden su tema con una precisión matemática absoluta: pueden predecir cómo se comportarán unas alas en condiciones de turbulencia, sólo con examinarlas en un túnel de aire o mediante una simulación en un ordenador; más o menos lo que podría hacer un biólogo para entender la mecánica de un animal. Pero, a pesar de lo incompleto de nuestra comprensión sobre cómo funciona un aeroplano, todos sabemos cómo se originó. Fue diseñado por unas personas en una mesa de dibujo. Después, otras personas fabricaron las piezas a partir de estos dibujos, y luego muchas más personas (con ayuda de máquinas diseñadas también por personas), atornillaron, remacharon, soldaron y encolaron las piezas, colocando cada una en su sitio correcto. El proceso por el cual se originó un aeroplano no es fundamentalmente misterioso para

nosotros, porque lo construyeron seres humanos. Colocar piezas de forma sistemática para realizar un diseño con una finalidad es algo que sabemos y comprendemos, porque lo hemos experimentado directamente, aunque sólo haya sido con nuestros juegos infantiles de construcciones.

¿Qué pasa con nuestros propios cuerpos? Cada uno de nosotros es una máquina, como un aeroplano, sólo que mucho más compleja. ¿Fuimos también diseñados en una mesa de dibujo, y nuestras piezas montadas por un hábil ingeniero? La respuesta es no. Es una respuesta sorprendente, y la conocemos y entendemos tan sólo desde hace alrededor de un siglo. Cuando Charles Darwin explicó este tema por primera vez, mucha gente no quiso, o no pudo, entenderle. Yo mismo rehusé llanamente creer la teoría de Darwin cuando la oí por vez primera, siendo niño. A lo largo de la historia, hasta la segunda mitad del siglo XIX, casi todo el mundo creyó firmemente en lo contrario: la teoría del Diseñador Consciente. Mucha gente todavía lo cree, quizá porque la verdad, la explicación darwiniana de nuestra propia existencia, no forma parte todavía (lo que resulta curioso) de los programas de educación. Por ese motivo, se la interpreta más erróneamente.

El relojero de mi título ha sido tomado prestado de un famoso tratado escrito por William Paley, teólogo del siglo XVIII. Su *Natural Theology – or Evidences of the Existence and Attributes of the Deity Collected from the Appearances of Nature* (Teología Natural – o pruebas de la existencia y atributos de la divinidad recogidas a partir de los aspectos de la naturaleza), publicado en 1802, es la exposición más conocida del «Argumento del Diseño», el argumento que más ha influido para demostrar la existencia de un Dios. Es un libro que admiro en gran medida, porque en su tiempo su autor tuvo éxito haciendo lo que yo estoy luchando por hacer ahora. Él tenía una idea que expresar, creía firmemente en ella, y no ahorró esfuerzos para expresarla con claridad. Sentía un respeto peculiar por la complejidad del mundo de los seres vivos, y observó que requería un tipo de explicación muy especial. En la única cosa en que se equivocó –y hay que admitir que se trataba de algo bastante importante– fue en la explicación. El dio la tradicional respuesta religiosa al acertijo, pero la articuló de una manera más clara y convincente de lo que lo habían hecho todos hasta entonces. La verdadera explicación, sin embargo, era totalmente distinta, y tuvo que esperar la llegada de uno de los pensadores más revolucionarios de todos los tiempos, Charles Darwin.

Paley comienza su *Natural Theology* con un famoso pasaje:

> Supongamos que, al cruzar un zarzal, mi pie tropieza con una *piedra*, y se me pregunta cómo esa piedra ha llegado hasta allí; probablemente, podría contestar que, por lo que yo sabía, había estado allí desde siempre: quizá tampoco sería fácil demostrar lo absurdo de esta respuesta. Pero supongamos que hubiese encontrado un *reloj* en el suelo, y se me preguntase qué había sucedido para que el reloj estuviese en aquel sitio; yo no podría dar la misma respuesta que antes, de que, por lo que yo sabía, el reloj podía haber estado allí desde siempre.

Paley aprecia aquí la diferencia entre los objetos físicos naturales, como las piedras, y los objetos diseñados y fabricados, como los relojes. Continúa exponiendo la precisión con la que están hechos los engranajes y muelles de un reloj, y la complejidad con la que están montados. Si en un zarzal encontráramos un objeto similar a un reloj, aunque desconociéramos cómo se podría haber producido su existencia, su precisión y la complejidad de su diseño nos forzaría a concluir

> que el reloj debió de tener un fabricante: que debió de existir en algún momento, y en algún lugar, un artífice o artífices, que lo construyeran con una finalidad cuya respuesta encontramos en la actualidad; que concibió su construcción, y diseñó su utilización.

Nadie podría contrariar razonablemente esta conclusión, insiste Paley, aunque esto es justo lo que hace en realidad el ateo, cuando contempla las obras de la naturaleza, ya que:

> cada indicación de una idea, cada manifestación de diseño que existe en el reloj, existe en las obras de la naturaleza; con la diferencia, por parte de éstas, de ser tan excelsas o más, y en un grado que supera todo cálculo.

Paley introduce su idea con descripciones bellas y reverentes de la maquinaria diseccionada de la vida, comenzando con el ojo humano, uno de los ejemplos favoritos que Darwin utilizaría posteriormente y que volverá a aparecer a lo largo de este libro. Paley compara el ojo con un instrumento diseñado como el telescopio, para concluir que «existen exactamente las mismas pruebas de que el ojo fue hecho para la visión, como de que el telescopio fue hecho para ayudarle en su función». Por lo tanto, el ojo debe haber tenido un diseñador, de la misma forma que lo tuvo el telescopio.

El argumento de Paley está formulado con una sinceridad apasionada e ilustrado con los conocimientos biológicos más avanzados de su tiempo, pero es erróneo, gloriosa y rotunda-

mente erróneo. La analogía entre el telescopio y el ojo, entre un reloj y un organismo vivo, es falsa. Aunque parezca lo contrario, el único relojero que existe en la naturaleza es la fuerza ciega de la física, aunque desplegada de manera especial. Un verdadero relojero tiene una previsión: diseña sus engranajes y muelles, y planifica las conexiones entre sí, con una finalidad en mente. La selección natural, el proceso automático, ciego e inconsciente que descubrió Darwin, y que ahora sabemos que es la explicación de la existencia y forma de todo tipo de vida con un propósito aparente, no tiene ninguna finalidad en mente. No tiene mente ni imaginación. No planifica el futuro. No tiene ninguna visión, ni previsión, ni vista. Si puede decirse que cumple una función de relojero en la naturaleza, ésta es la de relojero *ciego*.

Explicaré todo esto y mucho más. Pero una cosa que no haré será despreciar las maravillas de los «relojes» vivos, que tanto inspiraron a Paley. Por el contrario, trataré de ilustrar mi opinión de que aquí Paley podía haber ido incluso más lejos. Cuando se trata de esta sensación de reverencia ante los «relojes» vivos, no cedo ante nadie. Siento que tengo más cosas en común con el reverendo William Paley que con un distinguido filósofo moderno, un ateo muy conocido, con el que discutí una vez este tema durante una cena. Le dije que no me podía imaginar ser ateo antes de 1859, cuando se publicó el *Origen de las especies* de Darwin. «¿Y qué pasa con Hume?», replicó el filósofo. «¿Cómo explicó Hume la compleja organización del mundo vivo?», pregunté. «No lo hizo», contestó el filósofo. «¿Por qué necesita una explicación especial?»

Paley sabía que era necesaria una explicación especial; Darwin lo sabía, y sospecho que en lo profundo de su corazón, mi compañero, el filósofo, también lo sabía. En cualquier caso, mi trabajo consistirá en demostrarlo aquí. Respecto a David Hume, se ha dicho a veces que el gran filósofo escocés disponía del Argumento del Diseño un siglo antes que Darwin. Pero lo que Hume hizo fue criticar la lógica de la utilización del aparente diseño de la naturaleza como prueba *positiva* de la existencia de un Dios. No ofreció ninguna explicación *alternativa* a este aparente diseño, pero dejó planteada la cuestión. Un ateo anterior a Darwin podría haber dicho, siguiendo a Hume: «No tengo una explicación del complejo diseño biológico. Todo lo que sé es que Dios no es una buena explicación, de manera que debemos esperar y rogar que alguien ofrezca otra mejor.» Puedo presentir que esta postura, aunque lógicamente sensata, debía de dejar una sensación de honda insatisfacción, y que aunque el ateísmo pudiera mantenerse de una forma *lógica* antes de Darwin, éste hizo posible el ser un ateo completo intelectualmente hablando. Me gustaría pensar que Hume estaría de acuerdo, pero algunos de sus escritos sugieren que subestimaba la complejidad y belleza del diseño biológico. El joven naturalista Charles Darwin podría haberle enseñado una o dos cosas al respecto, pero Hume llevaba muerto cuarenta años cuando Darwin se matriculó en su Universidad de Edimburgo.

He hablado de complejidad y de diseño aparente muy a la ligera, como si el significado de estas palabras fuese obvio. En cierto sentido lo es: la mayoría de la gente tiene una idea intuitiva de lo que significa la complejidad. Pero estas nociones, complejidad y diseño, son tan importantes en este libro que debo tratar de captar con más precisión, en palabras, nuestra sensación de que hay algo especial sobre las cosas complejas, aparentemente diseñadas.

¿Qué es una cosa compleja? ¿Cómo la reconocemos? ¿En qué sentido es cierto que un reloj o un aeroplano o un ciempiés o una persona son complejos, y la luna, sin embargo, es simple? El primer punto que se nos podría ocurrir, como atributo necesario para que una cosa sea compleja, es que tenga una estructura heterogénea. Una tarta o un requesón son simples en el sentido de que, si los cortamos en dos, las dos porciones tienen la misma constitución interna: el requesón es homogéneo. Un coche es heterogéneo: a diferencia del requesón, casi todas las partes del coche son diferentes entre sí. El doble de una mitad del coche no permite formar otro coche. Esto nos lleva con frecuencia a decir que un objeto complejo, en contraposición con uno simple, tiene muchas partes, y que éstas son de varios tipos.

Esta heterogeneidad, o «composición de muchas partes», puede ser una condición necesaria, pero no es suficiente. Muchos objetos tienen muchas partes y son heterogéneos en cuanto a su estructura interna, sin ser complejos en el sentido en el que quiero utilizar el término. El Mont Blanc, por ejemplo, está compuesto de muchos tipos de rocas, mezcladas de tal forma que si cortamos la montaña por cualquier parte, las dos partes diferirán entre sí en su constitución interna. El Mont Blanc tiene una heterogeneidad estructural que no posee el requesón, pero aun así no es complejo en el sentido en el que un biólogo utiliza el término.

Probemos otra dirección en nuestra búsqueda de una definición de complejidad, haciendo uso de la idea matemática de probabilidad. Supongamos que ensayamos la siguiente definición: una cosa compleja es algo cuyas partes constituyentes están ordenadas de forma que es improbable que se haya originado sólo

por azar. Recordando un ejemplo de un conocido astrónomo, si cogemos las piezas de un aeroplano y las mezclamos al azar, la probabilidad de que se produzca el montaje de un Boeing que funcione es extremadamente pequeña. Existen miles de millones de maneras posibles de montar las piezas de un aeroplano, y de éstas sólo una, o unas pocas, constituirían en realidad un aeroplano. Pues todavía hay más formas de combinar las partes de un ser humano.

Este enfoque para encontrar una definición de complejidad es prometedor, pero se necesita algo más. Hay miles de millones de formas de mezclar los fragmentos del Mont Blanc, y podría decirse que sólo una de ellas es el Mont Blanc. Así pues, ¿qué es lo que hace que un aeroplano y un ser humano sean complejos y el Mont Blanc sea simple? Un acúmulo cualquiera de piezas antiguas mezcladas es único y, contemplándolo *retrospectivamente*, tan improbable como cualquier otro. Los montones de piezas de un desguace de aviones son únicos. No hay dos montones idénticos. Si se dejan caer piezas de aeroplanos en montones, la probabilidad de que se produzca exactamente la misma ordenación de la chatarra dos veces es casi tan baja como la probabilidad de que se monte un aeroplano que funcione. Así pues, ¿por qué no podemos decir que un vertedero de basura, o el Mont Blanc, o la luna son tan complejos como un aeroplano o un perro?, porque en todos estos casos el ordenamiento de los átomos es también «improbable».

El candado de mi bicicleta funciona mediante combinaciones, y tiene 4 096 posiciones diferentes. Cada una de ellas es igualmente «improbable» en el sentido de que si se hace girar al azar, cada una de las 4 096 posiciones tiene la misma probabilidad de aparecer. Puedo hacer girar las ruedecillas al azar, ver cualquier número que aparezca y exclamar con una visión retrospectiva: «¡Qué divertido. La probabilidad de que apareciera este número era de 1:4 096. ¡Un pequeño milagro!» Esto equivale a contemplar la ordenación particular de las rocas en una montaña, o de los fragmentos de metal en una pila de chatarra, como «complejos». Pero realmente sólo una de esas 4 096 posiciones tiene un interés particular: la combinación 1207 es la única que abre el candado. La rareza del número 1207 no tiene nada que ver con la percepción retrospectiva: estaba especificado de antemano por el fabricante. Si se hacen girar las ruedecillas al azar y se acierta con la combinación 1207 a la primera, se podría robar la bicicleta, y parecería un pequeño milagro. Si por suerte encontramos la combinación de uno de estos cerrojos múltiples que tienen las cajas fuertes de los bancos, entonces parecería un milagro mayor, ya que las probabilidades en contra son de

muchos millones a una, y en este caso se podría robar una fortuna.

Ahora bien, acertar el número de la suerte que abre la caja fuerte del banco es equivalente, en nuestra analogía, a tirar trozos de metal al azar y que se produzca el montaje de un Boeing 747. De todos los millones de posiciones únicas, y retrospectivamente igualmente improbables, de la combinación del cierre, sólo una abre la cerradura. De igual manera que, de todos los millones de ordenaciones únicas, y contempladas retrospectivamente igualmente improbables, de un montón de chatarra, sólo una (o muy pocas) volarán. La rareza del ordenamiento que vuela, o que abre la caja, no tiene nada que ver con la percepción retrospectiva. Están especificadas de antemano. El fabricante de cerraduras preparó la combinación, y se la comunicó al director del banco. La capacidad de volar es una propiedad de cualquier aeroplano que nosotros especificamos de antemano. Si vemos un avión en el aire podemos estar seguros de que no se montó tirando trozos de metal al azar, porque sabemos que las probabilidades en contra de que un conglomerado aleatorio sea capaz de volar son demasiado grandes.

Si consideramos todas las formas posibles como podrían haberse mezclado las rocas del Mont Blanc, es cierto que sólo una formaría el Mont Blanc como lo conocemos. Pero el Mont Blanc como lo conocemos no está definido con antelación. Cualquier manera de mezclar las rocas de entre un gran número sería etiquetada como una montaña, y podría llamarse Mont Blanc. No hay nada especial sobre el Mont Blanc que conocemos, nada especificado de antemano, nada equivalente a un aeroplano despegando, o a la puerta de una caja fuerte abriéndose y cayendo el dinero fuera.

¿Cuál es el equivalente de la puerta de una caja fuerte abriéndose, o de un avión volando, en el caso de un organismo vivo? Bien, a veces, es casi literalmente lo mismo. Las golondrinas vuelan. Como hemos visto, no es fácil construir una máquina voladora. Si se observan las células de una golondrina, y se colocan juntas al azar, la probabilidad de que el objeto resultante vuele no es, para nuestros propósitos, distinta de cero. No todos los seres vivos vuelan, pero hacen otras cosas que son igualmente poco probables, y que pueden ser igualmente especificadas de antemano. Las ballenas no vuelan, pero nadan, y lo hacen con la misma eficiencia con la que vuelan las golondrinas. La probabilidad de que un conjunto de células de ballena puestas juntas al azar pudiera nadar, dejando sentado el nadar tan rápida y eficientemente como lo hace en realidad una ballena, es despreciable.

En este punto, algún filósofo con ojos de halcón (los halcones tienen ojos muy agudos; no se podrían hacer ojos de halcón mezclando lentes y células sensoriales al azar) podría empezar a murmurar algo sobre un argumento circular. Las golondrinas vuelan pero no nadan; y las ballenas nadan pero no vuelan. Es de una manera retrospectiva como juzgamos si nuestro conglomerado aleatorio tiene éxito como nadador o como volador. Supongamos que acordamos al juzgar un éxito llamarlo X, y dejar abierto exactamente lo que es X hasta que hayamos realizado la experiencia de mezclar las células. El conjunto de células reunidas al azar podría resultar ser un eficiente excavador, como un topo, o un eficiente trepador, como un mono. Podría ser muy bueno practicando «windsurfing», o recogiendo restos de trapos viejos, o caminando en círculos decrecientes hasta desaparecer. La lista podría seguir indefinidamente. ¿O no?

Si la lista *pudiese* seguir indefinidamente, mi hipotético filósofo podría tener un argumento. Sí, no importa cómo mezclemos la materia de una forma aleatoria, puede decirse a menudo que el conjunto resultante, contemplado retrospectivamente, es bueno para *alguna actividad*, entonces podría decirse que mentí sobre la golondrina y la ballena. Pero los biólogos pueden ser mucho más específicos sobre lo que constituye el ser «bueno para alguna actividad». El requerimiento mínimo para que reconozcamos que un objeto es un animal o una planta es que pueda realizar una actividad viva *de cualquier tipo* (más exactamente, que él o, por lo menos, algunos miembros de su especie, vivan lo suficiente para reproducirse). Es cierto que hay bastantes maneras de expresar una vida: volar, nadar, columpiarse entre los árboles, etc. Pero, *a pesar de las numerosas formas que hay de estar vivo, lo cierto es que hay muchísimas más de estar muerto* o, mejor dicho, de estar no vivo. Pueden mezclarse células al azar, una y otra vez durante miles de millones de años, y no se producirá una sola vez un conjunto que vuele, o nade, o excave, o corra o desarrolle *alguna actividad*, aunque sea mal, que pueda interpretarse como mantenerse vivo.

Éste ha sido un argumento bastante largo y extenso, y es el momento de acordarnos de cómo entramos en él. Estábamos buscando una forma precisa de expresar el significado de lo que queríamos decir cuando nos referimos a algo como complejo. Estábamos tratando de apuntar qué tienen en común los seres humanos, los topos, los gusanos, los aeroplanos y los relojes, entre sí, pero no con el requesón o el Mont Blanc o la luna. La respuesta a la que hemos llegado es que las cosas complejas tienen alguna cualidad que puede ser especificada de antemano, que es muy poco probable que haya sido adquirida sólo por azar.

En el caso de las cosas vivas, la cualidad que se especifica de antemano es, en cierto sentido, una «habilidad»; bien sea una habilidad en algo concreto, como volar, produciendo la admiración de los ingenieros aeronáuticos; o una habilidad para hacer algo más general, como evitar la muerte, o propagar genes mediante la reproducción.

Evitar la muerte es algo en lo que hay que estar trabajando continuamente. Abandonado a su suerte –y esto es lo que sucede cuando muere– el cuerpo tiende a revertir a un estado de equilibrio con su medio ambiente. Si se mide algún parámetro como la temperatura, la acidez, el contenido de agua o el potencial eléctrico en un cuerpo vivo, se encontrará que es marcadamente distinto del que corresponde al medio ambiente. Nuestros cuerpos, por ejemplo, están más calientes que nuestro medio circundante, y en climas fríos tienen que trabajar duro para mantener esta diferencia. Cuando morimos, el cuerpo cesa en su actividad, la diferencia de temperatura comienza a desaparecer, y terminamos a la misma temperatura que nuestro medio circundante. No todos los animales trabajan tanto para evitar que se establezca un equilibrio con la temperatura ambiente, pero todos realizan *algún* trabajo equiparable. Por ejemplo, en un ambiente seco, los animales y las plantas trabajan para conservar el contenido líquido de sus células, en contra de la tendencia natural del agua a fluir fuera de ellas hacia el mundo exterior seco. Si fallan, mueren. En términos más generales, si los seres vivos no trabajasen activamente para prevenirlo, se fundirían con su medio circundante y dejarían de existir como seres autónomos. Esto es lo que sucede cuando mueren.

Con excepción de las máquinas artificiales, que ya hemos acordado en contarlas como seres vivos honorarios, los seres no vivos no trabajan en este sentido. Aceptan las fuerzas que tienden a situarlos en equilibrio con su medio ambiente. El Mont Blanc, con seguridad, ha existido desde hace mucho tiempo, y probablemente existirá todavía más, pero no se esfuerza para seguir existiendo. Cuando una roca se deposita por influencia de la gravedad, permanece allí. No hay que realizar ningún trabajo para que se mantenga en su sitio. El Mont Blanc existe, y continuará existiendo hasta que se consuma, o hasta que un terremoto lo derribe. No toma medidas para reparar el desgaste, o para ponerse derecho cuando lo derriban, como lo hace un organismo vivo. Simplemente, obedece las leyes ordinarias de la física.

Entonces, ¿hay que negar que los seres vivos obedecen las leyes de la física? Ciertamente, no. No hay razón para pensar que las leyes de la física sean violadas en los seres vivos. No

hay nada sobrenatural, ninguna «fuerza vital» que rivalice con las fuerzas fundamentales de la física. Es sólo que si tratamos de utilizar las leyes físicas, de forma inocente, para comprender el comportamiento de un organismo vivo *entero*, encontraremos que no podremos ir muy lejos. Un cuerpo es una cosa compleja con muchas partes constituyentes, y para comprender su comportamiento hay que aplicar las leyes de la física a cada una de sus partes, no al conjunto. El comportamiento del organismo surgirá entonces como un todo, como consecuencia de la interacción entre sus partes.

Consideremos las leyes del movimiento, por ejemplo. Si arrojamos un pájaro muerto al aire describirá una graciosa parábola, exactamente como enseñan los libros de física, y después caerá al suelo y permanecerá allí. Se comporta como debería hacerlo un cuerpo sólido con una masa y una resistencia al aire determinadas. Pero si lanzamos un pájaro vivo al aire, no describirá una parábola y caerá al suelo. Volará lejos, y puede que no toque tierra en este lado de la frontera. La razón es que tiene músculos que trabajan para vencer la gravedad y otras fuerzas que actúan sobre todo el cuerpo. Las leyes de la física están siendo obedecidas en cada una de sus células musculares. El resultado es que los músculos mueven las alas de forma que el pájaro permanece en lo alto. El pájaro no está violando la ley de la gravedad. Está siendo atraído constantemente hacia abajo, pero sus alas realizan un trabajo activo —obedeciendo a las leyes de la física en sus músculos— para mantenerse en lo alto, a pesar de la fuerza de la gravedad. Pensaríamos que está desafiando una ley física si fuésemos lo suficiente ingenuos como para tratarlo como un trozo de materia sin estructura con una masa y una resistencia al aire determinadas. Sólo cuando recordamos que tiene muchas partes internas, que obedecen a su nivel todas las leyes de la física, comprendemos el comportamiento de todo el cuerpo. Esto no es, por supuesto, una peculiaridad de los seres vivos. Se aplica a todas las máquinas hechas por el hombre, y potencialmente se aplica a cualquier objeto complejo, con muchas partes.

Lo expuesto me conduce al tema final que quiero discutir en este filosófico capítulo, el problema de lo que entiendo por explicación. Hemos visto lo que quiero significar al decir cosa compleja. Pero ¿qué clase de explicación nos dejaría satisfechos si nos preguntásemos cómo funciona una máquina compleja o un organismo vivo? La respuesta es aquella a la que llegamos en el párrafo anterior. Si deseamos comprender cómo funciona una máquina o un organismo vivo, observaremos sus componentes y preguntaremos cómo actúan entre sí. Si hay alguna cosa

compleja que no entendamos aún, podremos llegar a comprenderla en términos de partes más simples que ya comprendamos.

Si preguntase a un ingeniero cómo funciona una máquina a vapor, tengo una idea clara del tipo de respuesta que me dejaría satisfecho. Como Julian Huxley, no me impresionaría si el ingeniero me dijese que está propulsada por una «fuerza locomotriz». Y si comenzara a aburrirme diciéndome que el conjunto es mayor que la suma de las partes, le interrumpiría: «Eso no me importa, dígame sólo cómo *trabaja*.» Lo que me gustaría escuchar es algo sobre cómo actúan entre sí las piezas para producir el funcionamiento de la máquina en su conjunto. Estaría dispuesto, en principio, a aceptar una explicación en términos de subcomponentes bastante grandes, cuya estructura y funcionamiento interno pudieran ser bastante complejos y, quizá, no tener todavía explicación. Las unidades de una explicación inicialmente satisfactoria podrían tener nombres como fogón, caldera, cilindro, pistón, control del vapor. El ingeniero podría confirmar, en principio sin dar una explicación, lo que hace cada una de estas unidades. Aceptaría esto por el momento, sin preguntar cómo realiza cada unidad su trabajo en particular. Como cada unidad realiza un trabajo concreto, podría comprender entonces cómo actúan entre sí para hacer que se mueva la máquina en su conjunto.

Por supuesto, también puedo preguntar cómo trabaja cada una de las piezas. Después de aceptar el *hecho* de que el control de vapor regula el flujo de vapor, y habiéndolo utilizado para comprender el comportamiento de toda la máquina, puedo dirigir mi curiosidad hacia el propio control de vapor. Quiero comprender ahora cómo realiza su propio trabajo en términos de sus piezas internas. Hay una jerarquía de subcomponentes dentro de los componentes. Nosotros explicamos la conducta de un componente a un nivel determinado, en términos de interacciones entre subcomponentes cuya propia organización interna se da por supuesta, por el momento. Seguimos nuestro viaje jerárquico descendente, hasta que llegamos a unidades tan simples que, para nuestros propósitos, no sentimos necesidad de seguir preguntando. Correcta o erróneamente, por ejemplo, la mayoría de nosotros nos sentimos satisfechos con nuestros conocimientos sobre las propiedades de las barras rígidas de hierro, y estamos dispuestos a utilizarlas como unidades de explicación de máquinas más complejas de las que formen parte.

Los físicos, naturalmente, no dan por supuestas las propiedades de las barras de hierro. Preguntan por qué son rígidas, y continúan descendiendo algunos escalones más, hasta llegar a las partículas elementales y los quarks. Pero la vida es demasia-

do corta para que la mayoría de nosotros sigamos su camino. En cualquier nivel determinado de una organización compleja, pueden conseguirse explicaciones normalmente satisfactorias descendiendo uno o dos escalones desde nuestro nivel inicial, pero no más. El comportamiento de un motor de coche se explica en términos de cilindros, carburadores y bujías. Es cierto que cada uno de estos componentes descansa en lo alto de una pirámide de explicaciones a niveles inferiores. Pero si me preguntan cómo funciona un motor de coche la gente pensaría que soy algo sofisticado si contestara en términos de las leyes de Newton o de las leyes termodinámicas, y completamente oscurantista si contestara en términos de partículas fundamentales. Sin duda, es cierto que, en el fondo, el comportamiento de un motor de automóvil se explica en términos de interacciones entre partículas fundamentales. Pero resulta mucho más útil hacerlo en términos de interacciones entre pistones, cilindros y bujías.

El funcionamiento de un ordenador puede explicarse en términos de interacciones entre puertas electrónicas semiconductoras, y el de éstas, a su vez, lo explican los físicos a niveles todavía inferiores. Pero en la práctica, para la mayoría de nuestros propósitos, perderíamos el tiempo si tratásemos de comprender el funcionamiento de todo el ordenador a cualquiera de estos dos niveles. Hay demasiadas puertas electrónicas y demasiadas conexiones entre ellas. Una explicación satisfactoria tiene que hacerse en términos de un pequeño número manejable de interacciones. Así, si queremos comprender el funcionamiento de los ordenadores, preferiremos una explicación preliminar en términos de una media docena de subcomponentes principales: memoria, procesador, memoria de masa, unidad de control, control de entrada-salida, etc. Después de haber entendido las interacciones entre esta media docena de componentes principales, podemos hacer preguntas sobre la organización interna de los mismos. A pesar de todo, es probable que sólo los ingenieros especialistas desciendan hasta el nivel de las puertas AND y NOR, y que sólo los físicos desciendan más, hasta el nivel de comportamiento de los electrones en un medio semiconductor.

Para quienes gustan de los «-ismos», el nombre correcto de este enfoque, para tratar de comprender cómo funcionan las cosas, sea probablemente el de «reduccionismo jerárquico». Si se leen revistas intelectuales tendenciosas, podrá observarse en alguna ocasión que el «reduccionismo» es una de esas cosas que, como el pecado, sólo lo menciona la gente que está en contra de él. Llamarse a sí mismo reduccionista sonaría, en algunos círculos, a algo así como admitir que uno come niños. Pero de igual manera que actualmente nadie come niños, nadie es realmente reduccionista en algún sentido que valga la pena estar en contra. El reduccionista imaginario —la persona contra la que está todo el mundo, pero que sólo existe en su imaginación— trata de explicar el funcionamiento de las cosas complejas de una forma *directa*, en términos de sus *últimos componentes*, incluso, en algunas versiones extremas del mito, como la *suma* de estos componentes. Por el contrario, el reduccionista jerárquico trata de explicar el funcionamiento de una cosa compleja a cualquier nivel jerárquico de la organización en términos de componentes situados un nivel por debajo de la jerarquía; estos componentes es posible que sean lo suficientemente complejos como para necesitar una reducción adicional a sus propios elementos constituyentes, etc. Continúa sin decir, aunque el mítico reduccionista traganiños tiene reputación de negarlo, que el tipo de explicaciones apropiadas para un nivel jerárquico superior es bastante distinto del tipo apropiado para niveles jerárquicos inferiores. Esto era lo esencial al tratar de explicar los coches en términos de carburadores, en lugar de quarks. Pero el reduccionista jerárquico cree que los carburadores pueden explicarse en términos de unidades más pequeñas..., que, a su vez, se explican en términos de unidades más pequeñas..., que se explican, finalmente, en términos de las partículas fundamentales. El reduccionismo, en ese sentido, es simplemente un nombre más para un sincero deseo de comprender cómo funcionan las cosas.

Comenzamos esta sección preguntando qué clase de explicación sobre las cosas complejas nos dejaría satisfechos. Hemos considerado la pregunta desde el punto de vista de su mecanismo: ¿cómo funcionan? Llegamos a la conclusión de que el comportamiento de una cosa compleja debería explicarse en términos de interacciones entre sus componentes, consideradas como peldaños sucesivos de un orden jerárquico. Otra cuestión es, sin embargo, cómo empezaron a existir las cosas complejas. Es la pregunta de la que se ocupa todo este libro, de forma que no haré aquí muchos más comentarios sobre ella. Sólo mencionaré que se aplica el mismo principio general que en la explicación del mecanismo. Una cosa compleja es aquella cuya existencia no nos sentimos inclinados a dar por supuesta, porque es «muy poco probable». No podría haber llegado a existir mediante una intervención única del azar. Explicaremos cómo se produjo su existencia a consecuencia de un proceso de transformaciones graduales, cumulativas, hechas paso a paso a partir de cosas más simples, desde objetos primitivos, lo suficientemente simples como para haber llegado a existir por puro azar. De la misma manera que un «reduccionismo en una sola etapa» no puede servir como explicación de un mecanismo, y debe ser reempla-

zado por una serie de explicaciones paso a paso, profundizando en la jerarquía, de igual forma no podemos explicar una cosa compleja como originada en una sola etapa. Debemos, una vez más, buscar la salida en una serie de pequeños pasos, ordenados secuencialmente en el tiempo.

En su interesante libro *La creación*, el físico-químico Peter Atkins, de Oxford, comienza:

> Llevaré tu mente a un viaje. Es un viaje de entendimiento, que nos llevará al borde del espacio, el tiempo y la comprensión. Durante el mismo discutiré que no hay nada que no pueda ser comprendido, que no hay nada que no pueda ser explicado y que todas las cosas son extraordinariamente simples... Una gran parte del universo no necesita ninguna explicación. Por ejemplo, los elefantes. Una vez que las moléculas han aprendido a competir y a crear otras moléculas a su propia imagen, los elefantes y las cosas que son como los elefantes, se encontrarán, a su debido tiempo, vagando por los campos.

Atkins supone que la evolución de las cosas complejas, objeto de este libro, es inevitable una vez que se han fijado las condiciones físicas apropiadas. Se pregunta cuáles son las condiciones físicas mínimas necesarias, cuál la mínima cantidad de trabajo de diseño que tendría que llevar a cabo un Creador perezoso, de forma que el universo y, más tarde los elefantes y otras cosas complejas, llegaran a existir un día. La respuesta, desde su punto de vista de físico, es que el Creador podría ser infinitamente perezoso. Las unidades fundamentales originales que necesitamos postular, para poder comprender cómo han llegado a existir todas las cosas, consisten en literalmente nada (de acuerdo con unos físicos), o (de acuerdo con otros) en unidades de extrema simplicidad, demasiado simples para necesitar algo tan grande como una Creación deliberada.

Atkins dice que los elefantes y las cosas complejas no necesitan ninguna explicación. La razón es que él es un físico, que da por supuesta la teoría biológica de la evolución. No quiere decir, en realidad, que los elefantes no necesiten una explicación; más bien, está satisfecho de que los biólogos puedan explicar el porqué de los elefantes, siempre que se les permita dar por supuestos ciertos hechos físicos. Su tarea como físico, por tanto, es justificar el que demos estos hechos por supuestos. Esto lo hace con éxito. Mi postura es complementaria. Yo soy biólogo, y doy por supuestos los hechos físicos, los hechos del mundo de la simplicidad. Si los físicos no están aún de acuerdo sobre si se han comprendido estos hechos simples, no es mi problema. Mi tarea es la de explicar los elefantes, y el mundo de las

cosas complejas, en términos de cosas simples que los físicos entienden, o están trabajando en ellas. El problema del físico es el problema de los orígenes últimos, de las leyes naturales últimas. El problema del biólogo es el problema de la complejidad. El biólogo trata de explicar el funcionamiento y el inicio de la existencia de las cosas complejas, en términos de cosas más simples. Puede considerar su tarea finalizada cuando llegue a entidades tan simples que puedan ser transferidas a los físicos con seguridad.

Me doy cuenta de que mi caracterización de las cosas complejas, estadísticamente poco probables en una dirección no especificada de antemano, puede parecer idiosincrásica. Así puede parecer también mi caracterización de la física como el estudio de la simplicidad. Si se prefiere alguna otra forma de definir la complejidad, no me importa y estaría de acuerdo en seguir con esa definición durante toda la discusión. Pero lo único que me preocupa es que, cualquier cosa que sea lo que elijamos *llamar* la cualidad de ser estadísticamente-poco-probable-en-una-dirección-no-especificada-con-antelación, sea una cualidad importante que necesite de un esfuerzo especial para explicarla. Esta es la cualidad que caracteriza a los objetos biológicos, en contraposición con los objetos físicos. El tipo de explicación al que debemos llegar no debe contradecir las leyes de la física. Por el contrario, tiene que hacer uso de las mismas, y de nada más. Pero tiene que utilizar estas leyes de una manera especial, que no se discute ordinariamente en los manuales de física. Esta forma especial es la de Darwin. Presentaré los fundamentos esenciales en el capítulo 3, bajo el título de *selección cumulativa*.

Mientras tanto, quisiera seguir a Paley al recalcar la magnitud del problema con que se enfrenta nuestra explicación, la absoluta inmensidad de la complejidad biológica, y la belleza y elegancia del diseño biológico. El capítulo 2 es una amplia discusión de un ejemplo peculiar, el «radar» de los murciélagos, descubierto con posterioridad a la época en que vivió Paley. En este capítulo, he incluido una ilustración (figura 1) —¡cómo le hubiera gustado a Paley el microscopio electrónico!— de un ojo con dos ampliaciones sucesivas de un área concreta. En la parte superior de la figura hay una sección del ojo. Este nivel de magnificación muestra el ojo como un instrumento óptico. La semejanza con una cámara fotográfica es obvia. El diafragma del iris es responsable de la constante variación de la apertura, el «stop *f*». El cristalino, sólo una parte de un sistema lenticular compuesto, es el responsable del enfoque variable. La distancia focal se cambia comprimiendo el cristalino por acción de los músculos (o en los camaleones moviendo el cristalino hacia adelante

o hacia atrás, como en las cámaras hechas por el hombre). La imagen se proyecta sobre la retina, en la parte posterior, donde excita las fotocélulas.

La parte media de la figura 1 muestra una pequeña sección de la retina aumentada de tamaño. La luz procede de la izquierda. Las células sensibles a la luz («fotocélulas») no son lo primero con lo que se encuentra la luz, sino que están sepultadas en el interior, enfocadas en sentido contrario a la luz. Esta rara característica se mencionará de nuevo más adelante. La primera cosa que encuentra la luz es, de hecho, la capa de células ganglionares que constituye la «interfase electrónica» entre las fotocélulas y el cerebro. En realidad, las células ganglionares tienen la responsabilidad de pre-procesar la información con medios sofisticados, antes de transmitírsela al cerebro y, de alguna manera, la palabra «interfase» no hace justicia a esto. «Procesador periférico» podría ser un nombre más adecuado. Las conexiones de las células ganglionares discurren a lo largo de la superficie de la retina hasta la «mancha ciega», donde se sumergen a través de la retina para formar el tronco del cable principal hacia el cerebro, el nervio óptico. Hay alrededor de tres millones de células ganglionares en la «interfase electrónica», que recogen datos de unos 125 millones de fotocélulas.

En la parte inferior de la figura hay una fotocélula aumentada de tamaño, un bastón. Según se contempla su fina arquitectura, hay que recordar que toda esa complejidad se repite 125 millones de veces en cada retina. Y que una complejidad similar se repite billones de veces en cualquier parte de la unidad corporal. La cifra de 125 millones de fotocélulas es unas 5 000 veces el número de puntos que pueden resolverse separadamente en una fotografía periodística de buena calidad. Las membranas plegadas situadas en la parte derecha de la fotocélula ilustrada son las estructuras que recogen la luz. Su estructura en capas aumenta la eficacia de la célula para capturar fotones, las partículas fundamentales de las que está formada la luz. Si un fotón no es capturado por la primera membrana, puede ser capturado por la segunda, etc. El resultado es que algunos ojos son capaces de detectar un solo fotón. Las emulsiones fotográficas más rápidas y sensibles utilizadas por los fotógrafos necesitan unas 25 veces más fotones para detectar un punto de luz. Los objetos de forma elongada situados en la parte media de la célula son, en su mayoría, mitocondrias. Las mitocondrias no sólo se encuentran en las fotocélulas, sino también en la mayoría de las otras células. Cada una puede imaginarse como una factoría química que, en el proceso de distribuir su producto primario, la energía utilizable, procesa más de 700 sustancias químicas di-

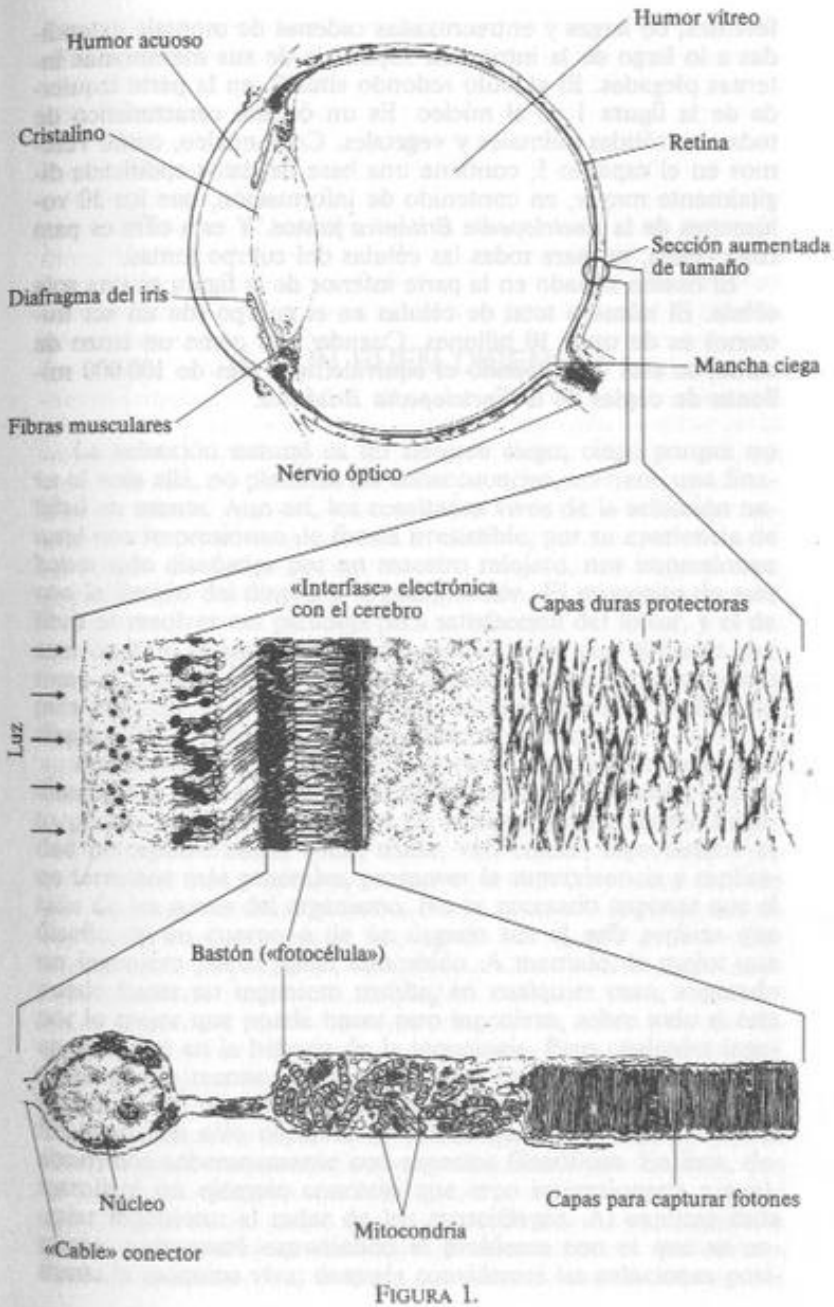


FIGURA 1.

ferentes, en largas y entrecruzadas cadenas de montaje extendidas a lo largo de la intrincada superficie de sus membranas internas plegadas. El glóbulo redondo situado en la parte izquierda de la figura 1 es el núcleo. Es un órgano característico de todas las células animales y vegetales. Cada núcleo, como veremos en el capítulo 5, contiene una base de datos codificada digitalmente mayor, en contenido de información, que los 30 volúmenes de la *Enciclopedia Británica* juntos. Y esta cifra es para *cada* célula, no para todas las células del cuerpo juntas.

El bastón situado en la parte inferior de la figura es una sola célula. El número total de células en el cuerpo (de un ser humano) es de unos 10 billones. Cuando uno come un trozo de carne, se está destruyendo el equivalente a más de 100 000 millones de copias de la *Enciclopedia Británica.*

2. UN BUEN DISEÑO

La selección natural es un relojero ciego; ciego porque no ve el más allá, no planifica las consecuencias, no tiene una finalidad en mente. Aun así, los resultados vivos de la selección natural nos impresionan de forma irresistible, por su apariencia de haber sido diseñados por un maestro relojero, nos impresionan con la ilusión del diseño y la planificación. El propósito de este libro es resolver esa paradoja para satisfacción del lector, y el de este capítulo es impresionar aún más al lector con el poder que tiene la ilusión del diseño. Estudiaremos un ejemplo concreto para concluir que, cuando se trata de complejidad y belleza de diseño, Paley apenas comenzó a discutir el tema.

Podemos decir que un cuerpo vivo o un órgano está bien diseñado si tiene atributos que un ingeniero inteligente y experto podría haber construido en él, para conseguir alguna finalidad perceptible como volar, nadar, ver, comer, reproducirse o, en términos más generales, promover la supervivencia y replicación de los genes del organismo. No es necesario suponer que el diseño de un cuerpo o de un órgano sea el *más perfecto* que un ingeniero pueda haber concebido. A menudo, lo mejor que puede hacer un ingeniero resulta, en cualquier caso, superado por lo mejor que puede hacer otro ingeniero, sobre todo si éste es posterior en la historia de la tecnología. Pero cualquier ingeniero puede reconocer un objeto que haya sido diseñado con una finalidad, aunque esté mal diseñado, y puede deducir dicha finalidad con sólo observar su estructura. En el capítulo 1 nos aburrimos soberanamente con aspectos filosóficos. En éste, desarrollaré un ejemplo concreto que creo impresionaría a cualquier ingeniero: el radar de los murciélagos. Al explicar cada punto, comenzaré exponiendo el problema con el que se enfrenta la máquina viva; después consideraré las soluciones posi-

bles que se le podrían ocurrir a un ingeniero; terminaré, finalmente, con la solución que de hecho ha adoptado la naturaleza. Este ejemplo es, por supuesto, sólo una ilustración. Si un ingeniero se impresiona con los murciélagos, se impresionará también con otra infinidad de ejemplos de diseño vivo.

Los murciélagos tienen un problema: cómo circular en la oscuridad. Cazan por la noche, y no pueden utilizar la luz para ayudarse a encontrar las presas y a evitar obstáculos. Podría decirse que si ello representa un problema, lo producen ellos mismos, y que podría evitarse cambiando sus hábitos y cazando de día. Pero la economía diurna está ya muy explotada por otras criaturas, como los pájaros. Y como hay una forma de ganarse la vida por la noche, y las posibilidades alternativas durante el día están completamente saturadas, la selección natural ha favorecido el desarrollo de los murciélagos que viven de la posibilidad de cazar de noche. Es probable, dicho sea de paso, que las actividades nocturnas se remonten a los antepasados de todos los mamíferos. En tiempos en que los dinosaurios dominaban la economía diurna, nuestros antepasados mamíferos probablemente sobrevivieron porque encontraron formas de desarrollar un medio de vida nocturno. Nuestros antepasados salieron a la luz del día en número sustancial sólo después de la misteriosa extinción masiva de los dinosaurios, hace alrededor de 65 millones de años.

Volviendo a nuestro tema, los murciélagos tienen un problema de ingeniería: cómo circular y encontrar sus presas en la oscuridad. Pero no son las únicas criaturas que se enfrentan con esta dificultad hoy día. Obviamente, los insectos que cazan también vuelan de noche y deben, por tanto, circular de alguna manera. Los peces de agua profunda y las ballenas tienen poca o nada de luz durante el día o la noche, porque los rayos del sol no pueden penetrar a mucha profundidad bajo la superficie del agua. Los peces y los delfines que viven en aguas extremadamente fangosas no pueden ver porque, aunque hay luz, está atenuada y disipada por la turbidez del agua. Otros muchos animales viven también actualmente en condiciones en las que es difícil o imposible ver.

Planteada la cuestión de cómo maniobrar en la oscuridad, ¿qué soluciones se le podrían ocurrir a un ingeniero? Lo primero que podría hacer es producir luz, utilizando una linterna o un foco eléctrico. Las luciérnagas y algunos peces (normalmente con ayuda de algunas bacterias) tienen la posibilidad de producir su propia luz, aunque el proceso parece que consume gran cantidad de energía. Las luciérnagas utilizan la luz para atraer a sus parejas. Esto no requiere mucha energía: el pequeño aguijón del macho puede ser visto por una hembra a cierta distancia en una noche oscura, porque sus ojos están directamente expuestos a la fuente de luz. Sin embargo, la utilización de la luz para circular requiere una cantidad mucho mayor de energía, porque los ojos tienen que detectar la diminuta fracción de luz que despide cada parte del escenario. La fuente de luz debe ser, por tanto, muchísimo más brillante si se va a utilizar como foco delantero para iluminar el camino, que si se utiliza como señal para otros. En cualquier caso, sea o no la razón el gasto de energía, parece ser que, con la posible excepción de algunos peces raros de agua profunda, ningún animal, aparte del hombre, utiliza la producción de luz para circular.

¿Qué más se le podría ocurrir a un ingeniero? Bien, parece que los ciegos tienen a veces un extraño sentido para detectar obstáculos en su camino. Se le ha dado el nombre de «visión facial», porque los ciegos describen que sienten algo así como una sensación de tacto en la cara. Existe un informe que describe a un niño ciego que podía conducir su triciclo a bastante velocidad alrededor de una manzana de viviendas cerca de su casa, utilizando la «visión facial». Los experimentos mostraron que, de hecho, la «visión facial» no tiene nada que ver con el tacto o la parte anterior de la cara, aunque la sensación pueda estar *referida* a esta zona, como lo está el dolor referido a un miembro fantasma (miembro seccionado). Esta sensación se percibe, en realidad, por los oídos. Los ciegos, sin darse cuenta del hecho, están utilizando los *ecos* de sus propios pasos y de otros sonidos, para detectar la presencia de obstáculos. Antes de que esto se descubriera, los ingenieros ya habían construido instrumentos para explotar este principio, por ejemplo, para medir la profundidad del mar debajo de un barco. Una vez inventada esta técnica, fue sólo cuestión de tiempo el que los diseñadores de armas la adaptaran para detectar submarinos. Ambos bandos en la segunda guerra mundial confiaron bastante en esta clase de instrumentos, conocidos bajo nombres codificados como el de Asdic (británico) y Sonar (americano), y en una tecnología similar, denominada Radar (americano) o RDF (británico), que utiliza ecos de ondas de radio en lugar de ecos de ondas sonoras.

Los pioneros del Sonar y del Radar no lo sabían entonces, pero ahora todos sabemos que los murciélagos o, mejor, la selección natural actuando sobre los murciélagos, habían perfeccionado este sistema decenas de millones de años antes, y que su «radar» consigue proezas de detección y navegación que los dejarían mudos de admiración. Es técnicamente incorrecto hablar del «radar» del murciélago, ya que no utiliza ondas de radio. Es realmente un sonar. Pero las teorías matemáticas básicas del

radar y del sonar son muy similares, y la mayor parte de nuestra comprensión científica de los detalles de lo que hacen los murciélagos son el resultado de aplicarles la teoría del radar. El zoólogo americano Donald Griffin, que fue en gran parte responsable del descubrimiento del sonar en los murciélagos, acuñó el término «ecolocalización» para cubrir tanto el sonar como el radar, tanto en animales como en instrumentos humanos. En la práctica, sin embargo, la palabra se utiliza principalmente para referirse al sonar animal.

Es erróneo hablar de murciélagos como si todos fuesen iguales. Es como si habláramos de perros, leones, comadrejas, osos, hienas, osos panda y nutrias, todos en un grupo, simplemente porque todos son carnívoros. Distintos grupos de murciélagos utilizan el sonar de forma radicalmente diferente, y parecen haberlo «inventado» separada e independientemente, como lo hicieron los británicos, alemanes y americanos en el caso del radar. No todos los murciélagos utilizan ecolocalización. Los murciélagos de la fruta tropical del Viejo Mundo tienen una buena visión, y la mayoría utilizan sólo sus ojos para circular. Sin embargo, una o dos especies de estos murciélagos, por ejemplo, los *Rousettus*, son capaces de volar en completa oscuridad donde los ojos, aunque sean buenos, no deben de tener ninguna utilidad. Utilizan el sonar, pero de una forma más rudimentaria que la utilizada por los pequeños murciélagos con los que estamos familiarizados en las regiones templadas. El *Rousettus* produce chasquidos agudos con su lengua de manera rítmica según va volando, y navega midiendo el intervalo de tiempo entre cada chasquido y su eco. Una gran proporción de los sonidos del *Rousettus* son claramente audibles para nosotros (lo que por definición los hace sonidos más que ultrasonidos: un ultrasonido es lo mismo que un sonido, excepto que es demasiado agudo para el oído humano).

En teoría, cuanto más agudo es un sonido, más utilidad tiene para la precisión del sonar. Esto se debe a que los sonidos graves tienen longitudes de onda mayores que no pueden resolver diferencias entre objetos cercanos. Por lo tanto, si mantenemos el resto de las cosas iguales, un proyectil que utilizase ecos en su sistema de guía debería producir idealmente sonidos muy agudos. La mayoría de los murciélagos, por supuesto, utilizan sonidos extremadamente agudos, demasiado agudos para el oído humano: ultrasonidos. A diferencia del *Rousettus*, que puede ver muy bien y que utiliza sonidos relativamente graves sin modificar para realizar una modesta proporción de ecolocalización que complemente su buena visión, los murciélagos más pequeños parecen ser máquinas de sonar muy avanzadas técnicamente.

Estos murciélagos tienen unos ojos tan pequeños, que, en la mayoría de los casos, probablemente no dejan ver demasiado. Viven en un mundo de ecos, y es probable que sus cerebros puedan utilizarlos para hacer algo similar a «ver» imágenes, aunque es casi imposible para nosotros «visualizar» lo que puedan parecer esas imágenes. Los ruidos que producen no son sólo demasiado agudos para el oído humano, como los de cierto tipo de supersilbatos para perros. En muchos casos, son muchísimo más agudos que la nota más aguda que cualquiera haya oído o pueda imaginar. Es una suerte que no podamos oírlos, dicho sea de paso, porque son tremendamente potentes y, si pudiéramos oírlos, resultarían ensordecedores, y no nos dejarían dormir.

Estos murciélagos son como aviones espía en miniatura, repletos de instrumentos sofisticados. Sus cerebros son paquetes de electrónica mágica miniaturizada delicadamente sintonizada, programada con el complejo *software* necesario para decodificar un mundo de ecos en tiempo real. Sus caras están con frecuencia distorsionadas en forma de gárgolas, y nos parecen feas hasta que nos damos cuenta para lo que son: instrumentos diseñados de forma exquisita para emitir ultrasonidos en la dirección deseada.

Aunque no podamos oír directamente las ondas de ultrasonidos que emiten estos murciélagos, podemos hacernos idea de lo que está pasando si utilizamos una máquina transductora o un «detector de murciélagos». Esta máquina recibe los impulsos a través de un micrófono ultrasónico especial, y los transforma en pequeños chasquidos o tonos audibles, que podemos oír a través de los auriculares. Si llevamos este «detector de murciélagos» a un lugar donde se esté alimentando un murciélago, oiremos *cuándo* emite sus impulsos, aunque no podamos oír cómo «suenan» en realidad. Si nuestro murciélago es un *Myotis*, uno de los pequeños murciélagos pardos comunes, oiremos un tableteo de pequeños chasquidos a un ritmo de 10 por segundo, cuando viaja en misión de rutina. Este es el ritmo de una impresora de telex estándar, o de una ametralladora Bren.

Presumiblemente, la imagen del mundo por el que está circulando el murciélago está siendo actualizada 10 veces por segundo. Nuestra propia imagen visual parece estar continuamente actualizada mientras nuestros ojos están abiertos. Podemos ver lo que podría parecer una imagen del mundo actualizada de manera intermitente, utilizando un estroboscopio por la noche. Esto se hace a veces en las discotecas, y produce algunos efectos dramáticos. Una persona mientras baila aparece como una sucesión de actitudes estáticas congeladas. Obviamente, cuanto más rápido pongamos el estroboscopio, más se corresponderá la

imagen con una visión normal «continua». El «muestreo» de la visión estroboscópica a la velocidad de crucero del murciélago, alrededor de 10 muestras por segundo, sería casi tan bueno como la visión normal «continua» para la realización de algunas tareas ordinarias, aunque no para coger una pelota o un insecto.

Ésta es la frecuencia utilizada cuando el murciélago circula en un vuelo de rutina. Cuando un *Myotis* detecta un insecto y comienza a moverse hacia él para interceptarlo, aumenta el ritmo de los pequeños chasquidos. Más rápido que una ametralladora, puede alcanzar una frecuencia máxima de 200 pulsaciones por segundo cuando se acerca por fin al objetivo en movimiento. Para simular este hecho, tendríamos que acelerar nuestro estroboscopio hasta que sus destellos alcanzaran una velocidad doble que los ciclos de la corriente eléctrica, que no se notan en un tubo de luz fluorescente. Obviamente, nosotros no tendríamos problemas para realizar todas nuestras funciones visuales normales, incluso jugar a squash o a pimpón, en un mundo visual «modulado» con una frecuencia tan elevada. Si podemos imaginarnos los cerebros de los murciélagos construyendo una imagen del mundo análoga a nuestras imágenes visuales, la frecuencia de los impulsos parece sugerir que la imagen ecográfica obtenida por el murciélago podría ser, por lo menos, tan detallada y «continua» como nuestra imagen visual. Por supuesto, puede haber otras razones por las que esta imagen no sea tan detallada como nuestra imagen visual.

Si los murciélagos son capaces de incrementar su frecuencia de muestreo hasta 200 veces por segundo, ¿por qué no mantenerla todo el tiempo? Ya que, evidentemente, tienen un «interruptor» que controla el ritmo en su «estroboscopio», ¿por qué no lo ponen permanentemente al máximo, manteniendo así todo el tiempo su percepción del mundo en su punto más sensible, para enfrentarse a cualquier emergencia? Una razón es que estas frecuencias elevadas sólo son apropiadas para objetivos cercanos. Si un impulso sigue demasiado cerca los talones de su predecesor, se mezcla con su eco de vuelta procedente de un objetivo distante. Aunque no sucediera así, existirían probablemente buenas razones de tipo económico para no mantener todo el tiempo una frecuencia máxima de impulsos. Debe de ser costoso producir ondas de ultrasonidos con un volumen elevado, costoso en energía, en utilización de voz y oídos, y quizá en tiempo de ordenador. Un cerebro que esté procesando 200 ecos diferentes por segundo puede que no encuentre un *surplus* de capacidad para pensar en algo más. Incluso la frecuencia de crucero de unas 10 pulsaciones por segundo es probablemente bastante costosa, aunque mucho menos que la frecuencia máxima

de 200 pulsaciones por segundo. Un murciélago que incrementase su frecuencia de crucero pagaría un precio adicional en energía, etc., que no estaría justificado por el aumento en agudeza del sonar. Cuando el único objeto que se mueve en la vecindad inmediata es el propio murciélago, el mundo aparente es lo suficientemente similar en sucesivas décimas de segundo como para no necesitar recibir información con una frecuencia mayor que ésta. Cuando el mundo en observación incluye otros objetos en movimiento, en particular un insecto volando, serpenteando, girando, subiendo y bajando en un intento desesperado por sacudirse de encima a su perseguidor, el beneficio conseguido por el murciélago al incrementar su frecuencia de muestreo justifica de sobra el aumento del costo. Por supuesto, las consideraciones de costo y beneficio en este párrafo son meras conjeturas, pero es casi cierto que pasa algo similar.

Un ingeniero que se pone a diseñar un instrumento de sonar o radar eficaz se encuentra pronto con el problema producido por la necesidad de emitir impulsos con un volumen muy fuerte. Tienen que tener este volumen porque cuando se emite un sonido, el frente de ondas avanza como una esfera en continua expansión. La intensidad del sonido se distribuye y, en cierto sentido, «se diluye» a lo largo de toda la superficie de la esfera. El área de la superficie de una esfera es proporcional al cuadrado del radio. La intensidad del sonido en cualquier punto determinado de la esfera disminuye, por tanto, no en proporción a la distancia (el radio) sino al cuadrado de la distancia desde la fuente del sonido, según avanza el frente de ondas y se ensancha la esfera. Esto significa que el sonido disminuye con bastante rapidez, según se aleja de su fuente, en este caso, el murciélago.

Cuando este sonido diluido encuentra un objeto, por ejemplo una mosca, rebota en ella. El sonido reflejado se radia, a su vez, desde la mosca, formando un frente de ondas esférico en expansión. Por la misma razón que en el caso anterior, su intensidad decaerá con el cuadrado de la distancia desde la mosca. Cuando el eco llegue de nuevo al murciélago, la disminución de su intensidad será proporcional no a la distancia entre él y la mosca, ni siquiera al cuadrado de esta distancia, sino a algo más, al cuadrado del cuadrado: la cuarta potencia de la distancia. Esto significa que llegará muy apagado. El problema podría superarse en parte si el murciélago emitiese los sonidos mediante el equivalente de un megáfono, aunque esto sólo es útil si conoce la dirección de la presa. En cualquier caso, si el murciélago tiene que recibir un eco razonable desde un objetivo distante, el chillido que sale debería tener un volumen muy fuerte cuando abandona al murciélago, y el instrumento que detecta el eco, el

oído, tendría que ser muy sensible a sonidos muy apagados (los ecos). Como era de esperar, los chillidos de los murciélagos tienen a menudo un volumen muy elevado, y sus oídos son muy sensibles.

Éste es el problema con el que se enfrentaría cualquier ingeniero que tratase de diseñar una máquina similar a un murciélago. Si el micrófono, u oído, es tan sensible como se ha expresado, corre entonces el grave peligro de resultar seriamente dañado por sus propios sonidos emitidos con un volumen demasiado alto. No es bueno tratar de resolver el problema acallando los sonidos, porque entonces los ecos serían demasiado tenues para ser oídos. Y no es bueno tratar de resolverlo haciendo un micrófono («oído») más sensible, ya que esto sólo lo haría más vulnerable al sonido emitido, aunque su volumen fuese ahora ligeramente inferior. Se trata de un dilema inherente a la dramática diferencia que existe entre la intensidad del sonido que se emite y del eco que se recibe, diferencia que viene impuesta, inexorablemente, por las leyes de la física.

¿Qué otra solución se le podría ocurrir al ingeniero? Cuando en la segunda guerra mundial los diseñadores de radar se enfrentaron con un problema análogo, encontraron una solución que llamaron radar «emisor/receptor». Las señales de radar tenían que enviarse necesariamente con impulsos muy potentes, que podrían haber dañado las antenas tan sensibles situadas a la espera de los débiles ecos de retorno. El circuito «emisor/receptor» desconectaba temporalmente la antena receptora, justo antes de emitir los impulsos, y la volvía a conectar de nuevo, a tiempo para recibir los ecos.

Los murciélagos desarrollaron la tecnología del mecanismo «emisor/receptor» hace muchísimo tiempo, probablemente millones de años antes de que nuestros antepasados bajaran de los árboles. Funciona de la siguiente manera. En los oídos de los murciélagos, como en los nuestros, el sonido se transmite desde el tímpano hasta los micrófonos, o sea, las células sensibles al sonido mediante un puente de tres huesos diminutos conocidos como el martillo, el yunque y el estribo, debido a su forma. El montaje y encaje de estos tres huesos, dicho sea de paso, está exactamente como lo hubiera diseñado un ingeniero de alta fidelidad para realizar una función precisa de «ajuste de impedancia», pero esto es otra historia. Lo que aquí importa es que algunos murciélagos tienen unos músculos bien desarrollados que se insertan en el estribo y en el martillo. Cuando estos músculos están contraídos, los huesos no transmiten el sonido de una manera tan eficiente; es como si se hiciera enmudecer un micrófono apoyando el dedo pulgar contra el diafragma vibratorio. El murciélago es capaz de utilizar estos músculos para desconectar sus oídos temporalmente. Los músculos se contraen inmediatamente antes de emitir un impulso, desconectando los oídos, de forma que no resulten dañados por el elevado volumen de la vibración sonora. Después se relajan de forma que el oído recupera su máxima sensibilidad, justo a tiempo para recibir los ecos de retorno. Este sistema interruptor emisor/receptor funciona sólo si se mantiene una precisión de medio segundo en la regulación del tiempo. El murciélago *Tadarida* es capaz de contraer y relajar alternativamente sus músculos interruptores 50 veces por segundo, manteniéndolos en perfecta sincronización con los impulsos de ultrasonidos tipo ametralladora. Es una proeza formidable de regulación de tiempo, comparable a un ingenioso truco que se utilizó en algunos aeroplanos durante la primera guerra mundial. Sus ametralladoras disparaban «a través» de la hélice, sincronizadas con la rotación de ésta, de forma que las balas pasaban entre las aspas sin tocarlas.

El siguiente problema que se le podría presentar a nuestro ingeniero es éste: si el mecanismo del sonar calcula la distancia con el objetivo midiendo la duración del silencio entre la emisión de un sonido y la recepción del eco resultante, método que parece que utiliza el *Rousettus*, los sonidos tendrían que ser muy breves, tendrían que ser vibraciones entrecortadas. Un sonido emitido durante un período largo de tiempo estaría emitiéndose aun cuando se recibiera su eco y, aunque éste estuviese parcialmente atenuado, los músculos del mecanismo emisor/receptor, se interpondrían en su detección. Por tanto, en teoría, los sonidos de los murciélagos tendrían que ser muy breves. Pero cuanto más breve es un sonido, más difícil es emitirlo con la suficiente energía para que produzca un eco decente. Parece que tenemos otro desafortunado intercambio impuesto por las leyes de la física. Existen dos soluciones que se les podrían ocurrir a los ingeniosos ingenieros y que, por supuesto, se les ocurrieron cuando se enfrentaron con el problema, una vez más, en el caso análogo del radar. Cuál de las dos soluciones es mejor, depende de si es más importante medir el intervalo (a cuánta distancia está el objeto del instrumento) o la velocidad (con qué rapidez se mueve el objeto con relación al instrumento). La primera solución es lo que conocen los ingenieros de radar con el nombre de «chirp-radar»

Podemos imaginar las señales de radar como una serie de impulsos, cada uno con la denominada frecuencia portadora. Esto es análogo al «tono» de una vibración de sonido, o ultrasonido. Los chillidos de los murciélagos, como hemos visto, tienen un régimen de repetición entre decenas y centenas de impulsos por

segundo. Cada uno de esos impulsos tiene una frecuencia portadora de decenas de miles a centenas de miles de ciclos por segundo. En otras palabras, cada impulso es un chillido de tono muy agudo. De manera similar, cada pulsación del radar es un «chillido» de ondas de radio, con una frecuencia portadora muy aguda. La característica especial del «chirp-radar» es que no tiene una frecuencia portadora fija durante cada chillido, sino que desciende, o se eleva, alrededor de una octava. Si se piensa en su equivalente sonoro, cada emisión de radar podría imaginarse como un silbido de tono variable. La ventaja del «chirp-radar», en contraposición con los impulsos de tono fijo, es la siguiente. No importa que el chillido original se esté emitiendo todavía cuando se recibe el eco. No se confundirán el uno con el otro, porque el eco que está siendo detectado en un momento dado es un reflejo del chillido anterior, y tendrá, así, un tono diferente.

Los diseñadores de radar hicieron buen uso de esta ingeniosa técnica. ¿Existe alguna prueba de que los murciélagos la hubiesen «descubierto» también, como sucedió con el sistema emisor/receptor? Bien, de hecho, numerosas especies de murciélagos producen chillidos con un tono descendente, de alrededor de una octava. Estos chillidos son como un silbido y se conocen como frecuencia modulada (FM). Parece que tienen justo lo necesario para explotar la técnica del «chirp-radar». Sin embargo, hasta ahora las pruebas parecen sugerir que los murciélagos utilizan esta técnica no para diferenciar un eco del sonido original que lo produjo, sino para la tarea más sutil de distinguir unos ecos de otros. El murciélago vive en un mundo de ecos producidos por objetos cercanos, distantes e intermedios. Tiene que clasificar estos ecos y separarlos unos de otros. Si emite chillidos con un silbido descendente, la clasificación se hace claramente por el tono. Cuando el murciélago recibe finalmente un eco procedente de un objeto distante, será un eco «más antiguo» que otro que esté llegando simultáneamente desde un objeto cercano. Tendrá un tono más agudo. Cuando el murciélago se enfrenta con sonidos de ecos de varios objetos, puede aplicar la regla del pulgar: el tono más agudo significa más lejos.

La segunda solución inteligente que se le podría ocurrir al ingeniero, especialmente si está interesado en medir la velocidad de un objetivo en movimiento, consiste en explotar lo que los físicos llaman el efecto Doppler. También podría llamarse «efecto ambulancia» porque su manifestación más familiar es la disminución súbita de tono de la sirena de una ambulancia al pasar veloz frente a una persona que está escuchando. El efecto Doppler se produce siempre que una fuente de sonido (o luz, u otro tipo de ondas) y su receptor se mueven uno con relación a

otro. Es más fácil imaginarse la fuente de sonido parada y la escucha moviéndose. Vamos a asumir que la sirena de una fábrica esté sonando continuamente, con un sonido monocorde. El sonido se emite como una serie de ondas. Las ondas no pueden verse porque son ondas de aire comprimido. Si pudieran verse parecerían círculos concéntricos extendiéndose hacia fuera como cuando arrojamos piedras en medio de un estanque tranquilo. Vamos a imaginar que dejamos caer una serie de piedras en sucesión rápida en medio de un estanque, de forma que se estén radiando ondas continuamente desde ese punto. Si amarramos un pequeño barco de juguete en algún punto fijo del estanque, el barco subirá y bajará rítmicamente según pasan las olas por debajo de él. La frecuencia con la que el barco sube y baja es análoga al tono de un sonido. Ahora supongamos que el barco, en lugar de estar amarrado, está navegando a través del estanque, en dirección hacia el punto donde se originan las ondas. Subirá y bajará según se vaya encontrando los frentes de ondas sucesivos, pero la frecuencia será mayor, ya que está viajando hacia la fuente productora. Por lo tanto, subirá y bajará a un ritmo mayor. Por el contrario, cuando haya pasado el punto de origen de las ondas y esté alejándose por el otro lado, la frecuencia de subida y bajada disminuirá, como es obvio.

De igual manera, si conducimos una motocicleta rápida (mejor si es silenciosa) y pasamos frente a la sirena ululante de una fábrica, cuando nos acerquemos el tono se hará más agudo: nuestros oídos están, en efecto, procesando las ondas a una velocidad mayor de lo que lo haríamos si permaneciésemos quietos, sentados. Por la misma razón, cuando nuestra motocicleta haya pasado frente a la factoría y se aleje de ella, el tono se hará más grave. Si nos detenemos, oiremos el tono de la sirena como es en realidad: un intermedio entre los dos tonos del efecto Doppler. Se deduce que, si conocemos el tono exacto de la sirena, es teóricamente posible deducir a qué velocidad nos acercamos o nos alejamos de ella con sólo escuchar el tono aparente y compararlo con el tono «verdadero» conocido.

El mismo principio se aplica cuando la fuente de sonido se mueve y la escucha está quieta. Así sucede en el caso de las ambulancias. Se dice, probablemente con poco fundamento, que Christian Doppler demostró el efecto que lleva su nombre contratando una banda de instrumentos de viento para que tocase en un vagón abierto mientras pasaba velozmente frente a su sorprendida audiencia. Lo importante es el movimiento relativo y, en lo que concierne al efecto Doppler, no importa si consideramos que la fuente de sonido se mueve y pasa frente a la escucha, o si es la escucha la que se mueve y pasa frente a la fuente

de sonido. Si se cruzan dos trenes que se mueven en sentido contrario, cada uno a 125 km/hora, los pasajeros de uno de los trenes oirán disminuir el silbido del otro tren, gracias al efecto Doppler, de una manera particular, ya que la velocidad relativa es de 250 km por hora.

El efecto Doppler se utiliza en los radares usados por la policía para detectar la velocidad de los motoristas. Un instrumento estático emite señales de radar hacia la carretera. Las ondas del radar se reflejan en los coches que se acercan, y son registradas por un aparato receptor. Cuanto más rápido se mueva un coche, mayor será la frecuencia del efecto Doppler. Comparando la frecuencia de salida con la del eco que recibe la policía, o, mejor dicho, su instrumento automático, se puede calcular la velocidad de cada coche. Si la policía puede explotar esta técnica para medir la velocidad de los conductores temerarios, ¿no esperaríamos descubrir que los murciélagos la utilizasen también para medir la velocidad de sus presas, los insectos?

La respuesta es afirmativa. Desde hace tiempo, se sabe que unos pequeños murciélagos conocidos como murciélagos-herradura emiten chillidos prolongados con un tono fijo, en lugar de chasquidos entrecortados o silbidos descendentes. Cuando digo prolongados, quiero decir prolongados para los estándares de los murciélagos. Los «chillidos» tienen una duración inferior a una décima de segundo y, como veremos, suelen incluir un silbido al final de cada uno. Imaginemos, en primer lugar, un murciélago-herradura emitiendo una serie de ultrasonidos según va volando con rapidez hacia un objeto estático, como un árbol. El frente de ondas se encontrará con el árbol con un ritmo acelerado, a causa del movimiento del murciélago en su dirección. Si hubiera un micrófono escondido en el árbol, «escucharíamos» el sonido modificado por el efecto Doppler hacia tonos más agudos, a causa de este movimiento. No hay ningún micrófono en el árbol, pero el eco reflejado se modificará de igual manera hacia tonos más agudos a causa del efecto Doppler. Ahora bien, el retorno del frente de ondas de los ecos desde el árbol hacia el murciélago que se aproxima hace que el murciélago se mueva todavía con más rapidez hacia él. Se producirá, por tanto, un efecto Doppler adicional hacia tonos más agudos, en el eco que recibe el murciélago. El movimiento del murciélago conduce a un tipo de doble efecto Doppler, cuya magnitud es una indicación precisa de la velocidad del murciélago en relación con el árbol. Comparando el tono de su chillido con el tono del eco que recibe de vuelta, el murciélago (o mejor, su ordenador de vuelo situado en su cerebro) podría calcular, en teoría, la rapidez con la que se está moviendo hacia el árbol. Esto no le señalaría a qué distancia está del árbol, pero podría darle, sin embargo, una información muy útil.

Si el objeto que refleja el eco no fuese un árbol estático sino un insecto en movimiento, las consecuencias del efecto Doppler serían más complejas, pero aun así el murciélago podría calcular la velocidad del movimiento relativo entre él y su objetivo, obviamente el tipo de información que necesita un sofisticado proyectil dirigido, como es un murciélago cazando. En realidad, algunos murciélagos realizan un truco más complejo que emitir simples chillidos de tono constante y medir el tono de los ecos que vuelven. Ajustan cuidadosamente el tono de los chillidos emitidos, de forma que mantienen constante el tono del eco después de haber sido modificado por el efecto Doppler. Tan pronto como se acercan a un insecto en movimiento, el tono de sus chillidos cambia de manera constante, buscando la forma de mantener los ecos de vuelta con un tono fijo. Este ingenioso truco mantiene los ecos en el tono en que sus oídos muestran la máxima sensibilidad, lo que tiene importancia porque los ecos son muy débiles. Pueden obtener así la información necesaria para los cálculos de su Doppler, vigilando el tono al que están obligados a gritar para conseguir un eco con un tono fijo. No sé si los mecanismos construidos por el hombre, sea el radar o el sonar, utilizan este truco tan sutil. Pero teniendo en cuenta el principio de que la mayoría de las ideas en este campo parecen haber sido desarrolladas antes por los murciélagos, no me importaría apostar a que la respuesta sea sí.

Sólo cabría esperar que dos técnicas tan diferentes, la del efecto Doppler y la del «chirp-radar», fuesen útiles para realizar funciones especializadas distintas. Unos grupos de murciélagos se especializan en una de ellas, otros en la otra. Algunos grupos tratan de obtener lo mejor de ambos mundos, uniendo un «silbido» de FM al final (o, algunas veces, al principio) de un «chillido» largo, con una frecuencia constante. Otro truco curioso utilizado por los murciélagos-herradura se refiere a los movimientos de sus pabellones auriculares. A diferencia de otros murciélagos, pueden mover sus pabellones auriculares en rápidos círculos hacia adelante y hacia atrás. Podría concebirse que este movimiento rápido adicional de la superficie de escucha con relación al objetivo produjera una modulación provechosa del efecto Doppler, que, a su vez, suministrase una información adicional. Cuando la oreja se mueve hacia el objetivo, aumenta la velocidad aparente del movimiento hacia el mismo. Cuando se aparta del objetivo, sucede lo contrario. El cerebro del murciélago «conoce» la dirección del movimiento de agitación de cada oreja y, en principio, podría hacer los cálculos necesarios para aprovechar esta información.

Posiblemente, el problema más difícil con el que tienen que enfrentarse los murciélagos sea el peligro de una «interferencia» inadvertida, producida por los chillidos de otros murciélagos. Los científicos han encontrado sorprendentemente difícil desviar a un murciélago de su camino emitiendo ultrasonidos artificiales de elevado volumen en su dirección. Analizándolo retrospectivamente, esto se podía haber adivinado. Los murciélagos deben de tener solucionado el problema de cómo evitar las interferencias desde hace mucho tiempo. Muchas especies viven en enormes colonias, en grutas que deben ser un babel ensordecedor de ultrasonidos y ecos, y, aun así, pueden volar rápidamente por la cueva, evitando chocar con las paredes y con los otros murciélagos en una oscuridad total. ¿Cómo está un murciélago al corriente de sus propios ecos, y no los confunde con los ecos de los otros? La primera solución que se le podría ocurrir a un ingeniero es algún tipo de código de frecuencia: cada murciélago podría tener su propia frecuencia privada, simplemente como si fuesen estaciones de radio independientes. Esto puede que suceda en cierta medida, pero, de todas formas, no es toda la historia.

La manera sobre cómo los murciélagos evitan las interferencias causadas por otros murciélagos no se comprende del todo, pero una pista interesante procede de los experimentos que tratan de eludirlos. Resulta que se puede engañar a los murciélagos si se emiten sus *propios* chillidos *retrasados* artificialmente. En otras palabras, emitiendo falsos ecos de sus propios chillidos. Es incluso posible, controlando cuidadosamente el equipo electrónico, retrasar el falso eco para intentar hacer aterrizar a los murciélagos en un rellano «fantasma». Supongo que para el murciélago sería el equivalente de mirar el mundo a través de una lente.

Parece ser que los murciélagos utilizan lo que podríamos llamar un «filtro de informaciones extrañas». Cada eco sucesivo procedente de los chillidos de un mismo murciélago produce una imagen del mundo que tiene sentido en términos de la imagen anterior, construida con los ecos precedentes. Si el cerebro de un murciélago escucha un eco procedente de un chillido de otro murciélago, e intenta incorporarlo a la imagen del mundo que ha construido con anterioridad, no tendrá sentido. Aparecerá como si los objetos en el mundo hubiesen saltado de repente en varias direcciones al azar. Los objetos en el mundo no se comportan de forma tan imprevista, de manera que el cerebro puede filtrar con seguridad este aparente eco como ruido de fondo. Si se suministra a un murciélago «ecos» de sus propios chillidos retrasados o acelerados artificialmente, los falsos

ecos *tendrán* sentido en términos de la imagen del mundo que el murciélago ha construido previamente. Los falsos ecos son aceptados por el filtro de informaciones extrañas porque son posibles dentro del contexto de los ecos previos. Esto produce la sensación de que los objetos apenas han variado su posición, que es lo que puede esperarse que hagan en el mundo real. El cerebro del murciélago confía en el supuesto de que el mundo descrito por cualquier impulso procedente de un eco es el mismo mundo descrito en impulsos previos, o un mundo sólo ligeramente diferente: por ejemplo, el insecto que está persiguiendo se puede haber movido un poco.

Hay un artículo muy conocido, del filósofo Thomas Nagel, titulado «*What is it like to be a bat?*» (¿Qué significa ser como un murciélago?). No trata tanto sobre los murciélagos como sobre el problema filosófico de imaginarnos qué significa ser «como» algo que no somos. La razón, sin embargo, por la que un murciélago es un ejemplo particularmente notable para un filósofo, estriba en que las experiencias de un murciélago que localiza las cosas mediante ecos se supone que son peculiarmente extrañas y diferentes de las nuestras. Si se quiere compartir la experiencia de un murciélago, es ciertamente erróneo entrar en una cueva, gritar o golpear dos cucharas, medir conscientemente el tiempo de espera antes de oír el eco, y calcular a partir de ahí la distancia a la que debe de estar la pared.

Esto es parecerse a un murciélago tanto como la siguiente descripción a lo que sería ver colores: utilicemos un instrumento para medir la longitud de onda de la luz que está entrando en el ojo. Si es larga, se está viendo el rojo; si es corta, se está viendo el azul o el violeta. Lo que sucede es un hecho físico: la luz que llamamos roja tiene una longitud de onda mayor que la luz que llamamos azul. Las distintas longitudes de onda entran en contacto en nuestra retina con fotocélulas sensibles al rojo o al azul. Pero no hay trazas del concepto de longitud de onda en nuestra sensación subjetiva de ver los colores. Nada sobre «qué significa» ver azul o rojo nos dice qué luz tiene la longitud de onda más larga. Si es importante (que normalmente no lo es), sólo tenemos que recordarlo, o (lo que yo hago siempre) consultarlo en un libro. De manera similar, un murciélago percibe la posición de un insecto utilizando lo que llamamos ecos. Pero lo que es seguro es que el murciélago no piensa más en términos de retrasos de ecos que lo que nosotros pensamos en términos de longitudes de ondas cuando percibimos el azul o el rojo.

Por supuesto, si se nos forzara a tratar lo imposible, imaginar lo que sería parecerse a un murciélago, yo opinaría que la

localización por ecos, para ellos, podría ser, en gran medida, como ver para nosotros. Somos animales tan profundamente visuales que raramente nos damos cuenta de la tarea tan compleja que es ver. Los objetos están «ahí fuera», y pensamos que los «vemos» ahí fuera. Pero sospecho que, en realidad, nuestra percepción visual es un elaborado modelo del ordenador del cerebro, construido sobre la base de la información que procede del exterior, transformada de forma que pueda ser *utilizada*. Las diferencias en las longitudes de onda de la luz externa se codifican como diferencias de «color» en el modelo del ordenador cerebral. La forma y otros atributos son codificados de igual manera, para poder ser manejados. La sensación de ver es, para nosotros, muy diferente de la sensación de oír, pero esto no puede deberse directamente a las diferencias físicas entre la luz y el sonido. Tanto la luz como el sonido son, después de todo, transmitidas por los respectivos órganos de los sentidos con el mismo tipo de impulsos nerviosos. Es imposible decir, a partir de los atributos físicos de un impulso nervioso, si lo que se está transmitiendo es información sobre la luz, el sonido o el olor. La razón por la que la sensación de ver es tan diferente de la de oír, y de la de oler, es porque el cerebro encuentra conveniente utilizar distintos tipos de modelos internos para el mundo visual, el del sonido y el del olor. Debido a que nosotros *utilizamos internamente* nuestra información visual y auditiva de distinta forma y con distintos fines, es por lo que las sensaciones de ver y oír son tan diferentes. No por las diferencias físicas entre la luz y el sonido.

Pero un murciélago utiliza la información *sonora* con el mismo fin que nosotros utilizamos la información *visual*. Utiliza los sonidos para percibir, y actualizar continuamente su percepción de la posición de los objetos en el espacio tridimensional, de la misma forma que nosotros utilizamos la luz. El modelo de ordenador interno necesario, por tanto, sería uno apropiado para la representación interna de los cambios de posición de los objetos en un espacio tridimensional. El punto al que quiero llegar es que la forma como adquiere un animal una experiencia subjetiva es una propiedad de su modelo de ordenador interno. Este modelo se selecciona, durante la evolución, por su conveniencia para una representación interna útil, prescindiendo de los estímulos físicos procedentes del exterior. Los murciélagos, y nosotros, *necesitamos* el mismo modelo interno de ordenador para representar los objetos en un espacio tridimensional. El hecho de que los murciélagos lo construyan con ayuda de los ecos, mientras que nosotros lo hacemos con ayuda de la luz, es irrelevante. La información del exterior es, en cualquier caso,

traducida al mismo tipo de impulsos nerviosos en su camino hacia el cerebro.

Mi hipótesis, por tanto, es que el murciélago «ve», en gran medida, de la misma manera que lo hacemos nosotros, aun cuando el medio físico por el que el mundo de «ahí fuera» es traducido en impulsos nerviosos sea tan diferente: ultrasonidos en lugar de luz. Los murciélagos podrían utilizar, incluso, las sensaciones que llamamos color para sus fines, para representar diferencias en el mundo exterior que no tienen nada que ver con la física de las longitudes de onda, pero que juegan un papel funcional para el murciélago, similar al que juegan los colores para nosotros. Quizá los murciélagos machos tengan una superficie corporal de una textura sutil, de forma que los ecos que se reflejan en ellas hagan que sean percibidos por las hembras como vistosamente coloreada, el equivalente sonoro al plumaje nupcial de un ave del paraíso. No lo digo como una vaga metáfora. Es posible que la sensación subjetiva experimentada por un murciélago hembra cuando percibe a un macho sea realmente, por un decir, rojo brillante: la misma sensación que yo experimento cuando veo un flamenco. O, cuando menos, la sensación que un murciélago tiene sobre su pareja puede que no se diferencie de la sensación visual que me produce a mí un flamenco, más que lo que ésta se diferencia de la sensación visual que un flamenco produce en otro flamenco.

Donald Griffin cuenta lo que le ocurrió a él y a su colega Robert Galambos, cuando describieron en 1940, por vez primera, en una reunión de asombrados zoólogos, su descubrimiento de la ecolocalización en los murciélagos. Un distinguido científico estaba tan indignado y se mostraba tan incrédulo que

> agarró a Galambos por los hombros y le sacudió, mientras se quejaba de que probablemente nosotros no queríamos hacer tan desaforada sugerencia. El radar y el sonar eran todavía desarrollos muy secretos de la tecnología militar, y la noción de que los murciélagos pudieran hacer algo aunque fuese remotamente análogo a los últimos triunfos de la ingeniería electrónica, sorprendió a mucha gente que lo consideró no sólo improbable sino emocionalmente repugnante.

Es fácil simpatizar con el distinguido escéptico. Hay algo muy humano en su rechazo a creer. Y esto, realmente, lo define: humano es precisamente lo que es. Es precisamente debido a que nuestros sentidos humanos *no* son capaces de hacer lo que hacen los murciélagos por lo que lo encontramos difícil de creer. Debido a que nosotros sólo podemos comprenderlo a nivel de ins-

trumentación artificial y cálculos matemáticos, encontramos difícil imaginar que un pequeño animal lo haga. No obstante, los cálculos matemáticos necesarios para explicar los principios de la visión son tan complejos y difíciles como éstos, y nadie duda de que los animales puedan ver. La razón para este doble estándar en nuestro escepticismo es bastante simple: nosotros podemos ver, pero no podemos ecolocalizar.

Podemos imaginarnos otro mundo, en el que una reunión de criaturas sabias y ciegas, similares a los murciélagos, se quedan estupefactas al relatarles que hay animales llamados hombres que son capaces de utilizar unos rayos inaudibles, denominados «luz», descubiertos recientemente, y objeto todavía de desarrollos militares de alto secreto, para circular. Estos, por otra parte, humildes seres humanos, son casi totalmente sordos (bueno, pueden oír en cierta medida e incluso proferir algunos gruñidos profundos, pronunciados con extremada lentitud, aunque sólo usan estos sonidos con propósitos rudimentarios como el de comunicarse entre ellos; no parecen ser capaces de usarlos para detectar objetos ni siquiera los muy grandes). En su lugar, utilizan órganos muy especializados, llamados «ojos», que aprovechan los rayos de «luz». El sol es la principal fuente de rayos de luz, y los seres humanos consiguen utilizar de manera admirable los complejos ecos que rebotan en los objetos cuando los rayos de luz chocan con ellos. Tienen un ingenioso dispositivo, denominado «cristalino», cuya forma parece calculada matemáticamente para desviar estos rayos silenciosos de manera que se produzca una equivalencia exacta, punto por punto, entre los objetos del mundo y una «imagen» de éstos, sobre una capa de células llamada «retina». Las células retinianas son capaces de transformar la luz en (podría decirse) algo «audible», de una manera misteriosa, y transmiten su información al cerebro. Nuestros matemáticos han demostrado que es teóricamente posible, realizando correctamente unos cálculos complejos, navegar sin peligro utilizando estos rayos de luz, de una manera tan eficaz como se hace ordinariamente utilizando los ultrasonidos, y, en algunos aspectos, ¡incluso *más*! Pero ¿quién hubiese pensado que un humilde ser humano pudiese hacer estos cálculos?

La utilización de sonidos y ecos por los murciélagos es solo uno de los miles de ejemplos que podría haber escogido para insistir sobre el tema del buen diseño. Desde un punto de vista práctico, los animales parecen haber sido diseñados por un ingeniero o un físico teóricamente sofisticado e ingenioso, pero no hay evidencia de que los propios murciélagos comprendan la teoría en el mismo sentido en que lo hace un físico. Hay que pensar en un murciélago como algo análogo al *instrumento* de

control de radar de la policía, y no a la persona que lo diseñó. El diseñador del radar que usa la policía para medir la velocidad comprendió la teoría del efecto Doppler, y la expresó en ecuaciones matemáticas, escritas explícitamente sobre un papel. La comprensión del diseñador está incorporada en el diseño del instrumento, pero el instrumento no comprende por sí mismo cómo funciona. El instrumento contiene componentes electrónicos conectados de manera que comparan dos frecuencias de radar automáticamente, y convierten el resultado en unidades prácticas: kilómetros por hora. Los cálculos implicados son complejos, pero se hallan dentro de las posibilidades de una cajita de modernos componentes electrónicos conectados correctamente. Está claro que un cerebro consciente sofisticado realizó las conexiones (o, por lo menos, diseñó el circuito), pero no hay ningún cerebro consciente implicado en el funcionamiento de la caja minuto a minuto.

Nuestra experiencia de la tecnología electrónica nos ayuda a aceptar la idea de que una maquinaria inconsciente pueda comportarse como si comprendiese ideas matemáticas complejas. Esta idea es directamente transferible al funcionamiento de la maquinaria viviente. Un murciélago es una máquina, cuya electrónica interna está tan bien conectada que los músculos de sus alas le hacen dar en el blanco de un insecto, como un misil dirigido inconsciente da en el blanco de un avión. Hasta aquí nuestra intuición, derivada de la tecnología, es correcta. Pero nuestra experiencia tecnológica nos prepara también para ver la mente de un diseñador consciente, con una finalidad, en la génesis de esta sofisticada maquinaria. Es esta segunda intuición la que resulta errónea en el caso de la maquinaria viva. En este caso, el «diseñador» es la selección natural inconsciente, el relojero ciego.

Espero que el lector esté tan sobrecogido como lo estoy yo, y como lo hubiese estado William Paley, con estas historias de murciélagos. La finalidad perseguida ha sido, en cierto aspecto, idéntica a la de Paley. No quiero que el lector subestime el prodigioso trabajo de la naturaleza y los problemas a los que nos enfrentamos para explicarlos. La ecolocalización de los murciélagos, aunque desconocida en tiempos de Paley, hubiera servido a su propósito tan bien como cualquiera de sus otros ejemplos. Paley remachó su argumento multiplicando los ejemplos. Recorrió todo el cuerpo, de la cabeza a los pies, mostrando cómo cada parte, cada mínimo detalle, era semejante al interior de un reloj bellamente diseñado. En muchos aspectos, me gustaría hacer lo mismo, porque hay historias maravillosas que contar, y a mí me gusta contarlas. Pero realmente no hay necesidad de

multiplicar los ejemplos. Bastará con presentar uno o dos. Una hipótesis que pueda explicar la navegación de los murciélagos es buena candidata para explicar cualquier cosa en el mundo de la vida, y si la explicación de Paley fuese errónea en cualquiera de sus casos, no podríamos corregirla multiplicando los ejemplos. Su hipótesis era que los relojes vivos fueron literalmente diseñados y construidos por un maestro relojero. Nuestra hipótesis actual es que el trabajo fue hecho por la selección natural, en estadios evolutivos graduales.

Hoy día los teólogos no son tan directos como Paley. No apuntan a los complejos mecanismos vivos y dicen que están evidentemente diseñados por un creador, como lo está un reloj. Pero existe una tendencia a apuntar hacia estos mecanismos y decir: «Es imposible creer» que tal complejidad y tal perfección puedan haber evolucionado por selección natural. Siempre que leo esta observación, siento la tentación de escribir al margen «Hable por usted mismo». Existen numerosos ejemplos (conté 35 en uno de los capítulos) en un libro reciente, titulado *The Probability of God* (La probabilidad de Dios), escrito por el obispo de Birmingham, Hugh Montefiore. Utilizaré este libro para mis ejemplos hasta el final de este capítulo, porque es un intento sincero y honesto, hecho por un escritor culto y con reputación, de actualizar la teología natural. Cuando digo honesto, quiero decir honesto. A diferencia de algunos de sus colegas teólogos, el obispo Montefiore no tiene miedo de exponer que la cuestión de la existencia de Dios es una cuestión de hecho bien definida. Él no plantea trucos con astutas evasiones, tales como que «la cristiandad es una forma de vida. La cuestión de la *existencia* de Dios se elimina: es un espejismo creado por las ilusiones del realismo». Algunos pasajes de su libro tratan sobre la física y la cosmología, y no me siento capaz de comentarlos; sólo de señalar que parece que ha utilizado a físicos genuinos como sus fuentes autorizadas. Desearía que hubiese hecho lo mismo en la parte biológica. Desgraciadamente, aquí prefirió consultar las obras de Arthur Koestler, Fred Hoyle, Gordon Rattray-Taylor y Karl Popper. El obispo cree en la evolución, pero no puede creer que la selección natural sea una explicación adecuada del curso que ha tomado la evolución (en parte porque, como muchos otros, malinterpreta tristemente la actuación de la selección natural como hecha «al azar» y «sin un fin»).

Abusa de lo que podríamos llamar el Argumento de la Incredulidad Personal. A lo largo de un capítulo encontramos las siguientes frases, en este orden:

> ...no parece que exista una explicación basada en Darwin... No es fácil explicar... Es difícil de comprender... No es fácil comprender... Es igualmente difícil explicar... No encuentro fácil comprender... No encuentro fácil ver... Me parece difícil de entender... no parece posible explicar... No puedo ver cómo... el neodarwinismo parece inadecuado para explicar muchas de las complejidades del comportamiento animal... no es fácil comprender cómo tal conducta pudo haber evolucionado sólo a través de la selección natural... Es imposible... ¿Cómo pudo evolucionar un órgano tan complejo...? No es fácil ver... Es difícil ver...

El Argumento de la Incredulidad Personal resulta extremadamente débil, como observó el propio Darwin. En algunos casos, se basa en la simple ignorancia. Por ejemplo, uno de los hechos que el obispo encuentra difícil de comprender es el color blanco de los osos polares.

> En cuanto al camuflaje, no siempre es fácilmente explicable sobre premisas neodarwinistas. Si los osos polares son dominantes en el Ártico, no parece entonces que hubiera necesidad de que evolucionasen hacia una forma de camuflaje de color blanco.

Esto debería traducirse:

> Personalmente, partiendo de mi insensatez, sentado en mi estudio, sin haber visitado nunca el Ártico, ni haber visto jamás un oso polar en estado salvaje, y habiendo sido educado en la literatura y teología clásicas, no he conseguido hallar hasta ahora una razón por la que los osos polares pudieran beneficiarse de ser blancos.

En este caso concreto, se supone que sólo los animales que son cazados necesitan camuflaje. Se pasa por alto que también los depredadores se benefician al ocultarse de sus presas. Los osos polares cazan al acecho focas que se encuentran descansando sobre el hielo. Si la foca ve venir al oso a lo lejos, puede escapar. Sospecho que, si se imaginase un oso pardo oscuro tratando de cazar focas sobre la nieve, el obispo hallaría de inmediato la respuesta a su problema.

El argumento del oso polar resultó demasiado fácil de demoler, pero no es lo que importa. Incluso si la primera autoridad mundial no pudiese explicar algún fenómeno biológico de importancia, ello no significaría que fuese inexplicable. Gran cantidad de misterios han durado siglos y, finalmente, se ha hallado una explicación. Por si vale la pena, la mayoría de los biólogos modernos no encontrarían difícil explicar cada uno de

los 35 ejemplos del obispo en términos de la teoría de la selección natural, aunque no todos son tan fáciles como el de los osos polares. Pero nosotros no estamos poniendo a prueba la ingenuidad humana. Incluso si encontráramos un ejemplo que *no pudiésemos* explicar, deberíamos dudar antes de llegar a cualquier conclusión grandiosa, partiendo del hecho de nuestra propia incapacidad. El propio Darwin fue muy claro en este punto.

Hay versiones más serias del Argumento de la Incredulidad Personal, que no descansan simplemente en la ignorancia o falta de ingenuidad. Una de las variantes del argumento utiliza el sentimiento extremo de admiración que todos sentimos cuando nos enfrentamos con un mecanismo muy complejo, como la perfección detallada del equipo de ecolocalización de los murciélagos. La implicación que esto tiene es que resulta evidente que algo tan maravilloso probablemente no podría haber evolucionado por selección natural. El obispo cita, con autorización, un texto de G. Bennett sobre las telas de araña:

> Es imposible que cualquiera que haya observado este trabajo durante muchas horas, tenga la menor duda de que las arañas modernas de esta especie o sus antepasados hayan sido en algún momento los arquitectos de la tela de araña, o conciba que ésta pudiese haber sido producida paso a paso mediante variaciones aleatorias; sería tan absurdo como suponer que las intrincadas y exactas proporciones del Partenón se hubiesen producido apilando trozos de mármol.

No es del todo imposible. Esto es exactamente lo que creo, y tengo cierta experiencia en arañas y sus telas.

El obispo continúa con el ojo humano, preguntando retóricamente, con la seguridad de que no existe respuesta: «¿Cómo pudo evolucionar un órgano tan complejo?» Esto no es un argumento, es simplemente una afirmación de incredulidad. El motivo fundamental de la incredulidad intuitiva que todos estamos tentados a sentir sobre lo que Darwin llamó órganos de extrema perfección y complejidad, creo que es doble. Primero, no tenemos un dominio intuitivo de la inmensidad de tiempo disponible para el cambio evolutivo. La mayoría de los escépticos sobre la selección natural están dispuestos a aceptar que se pueden realizar pequeños cambios, como la coloración oscura que ha evolucionado en varias especies de polillas desde la revolución industrial. Pero, después de admitirlo, indican lo pequeño que es el cambio. Como subraya el obispo, la polilla oscura no es una *nueva especie*. Estoy de acuerdo en que es un cambio

pequeño, que no tiene parangón con la evolución del ojo, o la de la ecolocalización. Pero igualmente, las polillas sólo necesitaron cien años para realizar este cambio. A nosotros nos parece que cien años es mucho tiempo porque constituye un período más largo que nuestra vida. Pero para un geólogo es unas mil veces más corto que lo que él suele medir.

Los ojos no se fosilizan, de manera que no sabemos cuánto tiempo fue necesario para que nuestro tipo de ojo evolucionase desde la nada hasta su complejidad y perfección actuales, pero el tiempo disponible es de varios cientos de millones de años. Hay que pensar, a modo de comparación, en los cambios que el hombre ha conseguido en un tiempo más corto con la selección genética de perros. En unos pocos de cientos o, como mucho, miles de años hemos ido desde el lobo al pekinés, bulldog, chihuahua y San Bernardo. Ah, pero siguen siendo *perros*, ¿no? ¿No se han transformado en un tipo de animal diferente? Sí, si conforta jugar con palabras como ésta, se les puede llamar perros a todos. Pero hay que pensar en el tiempo invertido. Representemos todo el tiempo necesario para que evolucionasen estas razas de perro a partir del lobo, por un modo normal de andar. A esa misma escala, ¿cuánta distancia tendríamos que andar, para volver hasta Lucy y sus parientes, los fósiles humanos más primitivos que caminaron inequívocamente erectos? La respuesta es alrededor de tres kilómetros. Y ¿qué distancia se tendría que caminar para volver al comienzo de la evolución sobre la Tierra? La respuesta es que habría que recorrer todo el camino desde Londres a Bagdad. Hay que pensar en la cantidad de cambios producidos en ir desde el lobo hasta el chihuahua, y multiplicarla luego por el número de pasos entre Londres y Bagdad. Esto nos dará una idea aproximada del cambio que podemos esperar en la evolución natural real.

El segundo motivo de nuestra incredulidad natural sobre la evolución de órganos muy complejos, como el ojo humano y las orejas del murciélago, consiste en una aplicación intuitiva de la teoría de la probabilidad. El obispo Montefiore acota una cita de C. E. Raven sobre los cuclillos. Éstos ponen sus huevos en el nido de otros pájaros, que actúan como padres adoptivos involuntarios. Como tantas adaptaciones biológicas, ésta no es única sino múltiple. Varios hechos diferentes sobre los cuclillos los hacen adaptarse a su forma de vida parasitaria. Por ejemplo, la madre tiene la costumbre de poner los huevos en los nidos de otros pájaros, y la cría la costumbre de lanzar fuera del nido a los polluelos del anfitrión. Los dos hábitos ayudan al cuclillo a triunfar en su vida parasitaria. Raven continúa:

Se observará que cada paso dentro de esta secuencia de condiciones es esencial para el éxito del conjunto. Y aun así cada uno por sí solo no tiene utilidad. El *opus perfectum* completo tiene que conseguirse simultáneamente. Las probabilidades en contra de la ocurrencia aleatoria de estas series de coincidencias son, como ya hemos constatado, astronómicas.

Este tipo de argumentos son, en principio, más respetables que los basados en la pura y desnuda incredulidad. El cálculo de la improbabilidad estadística de una sugerencia es la forma correcta de ir por ahí evaluando su credibilidad. Es un método que usaré en este libro en diferentes ocasiones. Pero hay que hacerlo bien. Hay dos puntos erróneos en el argumento de Raven. Primero, la familiar y, tengo que decirlo, bastante irritante confusión de la selección natural con el «azar». La mutación es azar; pero la selección natural es lo contrario del azar. Segundo, no es *cierto* que «cada una por sí sola no tiene utilidad». No es verdad que el trabajo perfecto en su totalidad haya tenido que ser realizado de manera simultánea. No es verdad que cada parte sea esencial para el éxito de la totalidad. Una simple rudimentaria mitad del sistema de ecolocalización ojo/oído o del sistema cuclillo/parasitismo es mejor que nada. Sin ningún ojo uno está completamente ciego. Con medio ojo uno puede detectar, por lo menos, la dirección general del movimiento de un depredador, aunque no pueda enfocar una imagen clara. Y esto puede significar la diferencia entre la vida y la muerte. Volveré sobre estos temas en los dos próximos capítulos.

3. ACUMULAR PEQUEÑOS CAMBIOS

Hemos visto que las cosas vivas son demasiado improbables y están demasiado bellamente «diseñadas» como para haber comenzado a existir por azar. ¿Cómo, pues, comenzaron a existir? La respuesta, la de Darwin, es mediante transformaciones graduales, paso a paso, a partir de unos orígenes elementales, de unas entidades primordiales lo suficientemente simples como para haber comenzado a existir espontáneamente. Cada cambio a lo largo de este proceso gradual evolutivo fue lo suficientemente simple, *comparado con su predecesor,* como para haberse producido por azar. Pero la secuencia completa de pasos acumulados constituye cualquier cosa menos un proceso aleatorio, si se considera la complejidad del producto final con relación al punto de partida. El proceso acumulativo está dirigido por una supervivencia no aleatoria. La intención de este capítulo es demostrar el poder de la *selección cumulativa* como un proceso que, fundamentalmente, no sigue las leyes del azar.

Si uno pasea arriba y abajo por una playa pedregosa, observará que las piedras no están ordenadas al azar. Las piedras más pequeñas tienden a encontrarse en zonas segregadas que discurren a lo largo de la playa, mientras que las más grandes están en zonas o franjas diferentes. Las piedras han sido clasificadas, ordenadas, seleccionadas. Una tribu que viviese cerca de la costa podría maravillarse ante esta prueba de clasificación u ordenamiento del mundo, y podría desarrollar un mito para explicarlo, atribuyéndolo, quizás, a un Gran Espíritu celestial con una mente ordenada y un gran sentido del orden. Podríamos sonreír con indiferencia ante esta idea supersticiosa, y explicar que, en realidad, el ordenamiento se debe a las fuerzas ciegas de la física, en este caso, la acción de las olas. Las olas no tienen ninguna finalidad, ni intención, ni una mente ordenada, no tienen mente.

Simplemente, empujan las piedras con energía, y según éstas sean grandes o pequeñas responderán de manera diferente a este tratamiento, de manera que terminen a diferentes niveles de la playa. A partir de un gran desorden se origina un poco de orden, sin que lo planifique ninguna mente.

Las olas y las piedras juntas constituyen un ejemplo sencillo de un sistema que genera automáticamente un orden. El mundo está lleno de estos sistemas. El ejemplo más simple que se me ocurre es el de un agujero. Sólo los objetos más pequeños que él pueden pasar a su través. Esto significa que si empezamos con un conjunto de objetos ordenados al azar situados encima del agujero, y los agitamos y hacemos chocar entre sí, al cabo de un tiempo los objetos situados por encima y por debajo del agujero estarán clasificados de una forma no aleatoria. El espacio situado por debajo del agujero mostrará una tendencia a contener los objetos más pequeños que el agujero, y, el espacio situado por encima, los objetos más grandes. Por supuesto, la humanidad ha usado desde hace tiempo este principio tan simple de generar orden, mediante un dispositivo muy útil conocido como criba.

El sistema solar es una ordenación estable de planetas, cometas y restos que giran en órbitas alrededor del Sol, y es presumiblemente uno de los muchos sistemas orbitales en el universo. Cuando más cerca se encuentra un satélite del Sol, más rápido tiene que viajar en orden a contrarrestar la fuerza de la gravedad del Sol y permanecer en una órbita estable. En una órbita determinada, sólo hay una velocidad a la que el satélite puede viajar y permanecer en ella. Si estuviese viajando a cualquier otra velocidad, se escaparía hacia el espacio exterior, se estrellaría contra el Sol, o se movería hacia otra órbita. Si contemplamos los planetas de nuestro sistema solar, he aquí que cada uno viaja exactamente a la velocidad correcta para mantenerse en una órbita estable alrededor del Sol. ¿Milagro divino o designio de la providencia? No, simplemente otra «criba» natural. Todos los planetas que vemos describiendo órbitas alrededor del Sol tienen que viajar a la velocidad correcta para mantenerse en sus órbitas, o no los veríamos porque no estarían allí. Esto no constituye una prueba de la existencia de un diseño consciente. Es simplemente un tipo más de clasificación.

Una selección de este orden de simplicidad no es suficiente por sí misma para explicar la gran proporción de orden no aleatorio que apreciamos en las cosas vivas. De ninguna forma. Hay que recordar la analogía del cierre de combinación. El tipo de ordenamiento que puede generarse por simple selección es más o menos equivalente a abrir un cierre de combinación con una

sola ruedecilla: es más fácil abrirlo por pura suerte. Por el contrario, el tipo de ordenamiento que vemos en los sistemas vivos es equivalente a un gigantesco cierre de combinación con un número infinito de ruedecillas. Generar una molécula biológica como la hemoglobina, el pigmento rojo de la sangre, por simple selección, equivaldría a coger todos los aminoácidos que forman los bloques con los que está construida, mezclarlos, y esperar que la molécula de hemoglobina se reconstruya al azar. La suerte necesaria para realizar esta hazaña resulta impensable, e Isaac Asimov y otros autores la han utilizado como eficaz paradoja.

Una molécula de hemoglobina consta de cuatro cadenas de aminoácidos entrelazadas. Pensemos sólo en una de ellas. Está formada por 146 aminoácidos. Hay 20 tipos diferentes de aminoácidos que se encuentran habitualmente formando parte de las cosas vivas. El número de posibilidades de ordenar los 20 tipos de aminoácidos en cadenas de 146 eslabones de longitud es un número inconcebiblemente grande, que Asimov llama el «número de la hemoglobina». La respuesta es fácil de calcular, pero difícil de visualizar. El primer eslabón de la cadena de 146 podría ser cualquiera de los 20 aminoácidos. El segundo eslabón podría ser también cualquiera de los 20, de forma que el número de cadenas posibles de 2 eslabones es de 20×20, o sea, 400. El número de cadenas posibles de 3 eslabones es de $20 \times \times 20 \times 20$, o sea, 8 000. El número de cadenas posibles de 146 eslabones es de 20 elevado a 146. Este es un número asombrosamente grande. Un millón es un 1 con 6 ceros detrás. Un billón es un 1 con 9 ceros detrás.[1] El número que buscamos, el «número de la hemoglobina», es (casi) ¡un 1 con 190 ceros detrás! Esta es la probabilidad de que se acierte con la hemoglobina por pura suerte. Y una molécula de hemoglobina representa sólo una diminuta fracción de la complejidad de un cuerpo viviente. La simple selección, por sí misma, no es capaz de generar la cantidad necesaria de orden que hay en un cuerpo vivo. La selección es un ingrediente esencial en esta generación del orden viviente, pero está muy lejos de ser toda la historia. Se necesita algo más. Para explicar este punto, necesito hacer una distinción entre selección «en una sola etapa» y selección «cumulativa». Las clasificaciones simples que hemos considerado hasta ahora en este capítulo son ejemplos de selección «en una sola etapa». La organización viviente es producto de una selección cumulativa.

La diferencia esencial entre ambas selecciones es la siguiente. En la selección en una sola etapa, los objetos seleccionados

1. El billón norteamericano equivale a 1000 millones. *(N. del T.)*

o clasificados, piedras o lo que sean, son clasificados una sola vez y para siempre. En la selección cumulativa, sin embargo, «se reproducen»; o, dicho de otra forma, los resultados de un proceso de clasificación son introducidos en una clasificación posterior, que es introducida a su vez en..., etc. Las cosas están sujetas a una clasificación por selección sobre muchas «generaciones» sucesivas. El producto final de la selección de una generación es el punto de partida de la selección de la siguiente generación, y así durante muchas generaciones. Es natural tomar prestadas palabras como «reproducirse» y «generación», que están asociadas con las cosas vivas, porque las cosas vivas son los principales ejemplos que conocemos de cosas que participan en la selección cumulativa. Pueden ser, en la práctica, las únicas cosas que lo hagan. Pero, por el momento, no quiero introducir esta cuestión de una manera tan directa.

Las nubes, a veces, debido a la acción modeladora y escultora del viento, llegan a parecernos objetos familiares. Hay una fotografía muy difundida, hecha por el piloto de un pequeño aeroplano, de algo que se parece un poco a la cara de Jesucristo, destacándose en el cielo. Todos hemos visto nubes que nos recordaban algo: un caballito de mar, o una cara sonriente. Estas semejanzas se originan por selección en una sola etapa, es decir, por una coincidencia única. No resultan, en consecuencia, demasiado impresionantes. La semejanza de los signos del zodíaco con los animales del mismo nombre, Escorpio, Leo, etc., impresionan tan poco como las predicciones de los astrólogos. No nos sentimos confundidos por el parecido, tanto como lo estamos por las adaptaciones biológicas, los productos de la selección cumulativa. Describimos como rara, misteriosa o espectacular, la semejanza entre, digamos, un insecto con forma de hoja y una hoja o una mantis religiosa y un ramillete de flores. El parecido entre una nube y una comadreja es algo poco divertido, por lo que no merece la pena llamar la atención de nuestro compañero. Por otra parte, es bastante probable que cambiemos fácilmente nuestra idea sobre cuál es exactamente el parecido de una nube.

HAMLET: ¿Veis aquella nube que tiene forma casi de camello?
POLONIUS: Sí, claro, por el tamaño parece un camello.
HAMLET: No, creo que parece una comadreja.
POLONIUS: Sí, tiene un lomo como el de una comadreja.
HAMLET: ¿O una ballena?
POLONIUS: Sí, es muy parecida a una ballena.

No sé quién fue el primero en señalar que, dándole el tiempo suficiente, un mono, tecleando al azar en una máquina de

escribir, podría escribir las obras de Shakespeare. La frase operativa es, por supuesto, dándole el tiempo suficiente. Limitemos de alguna manera el trabajo de nuestro mono. Supongamos que no tenga que escribir las obras completas de Shakespeare, sino sólo una frase corta: «*Methinks is like a weasel*» (Creo que parece una comadreja) y facilitemos su trabajo dándole una máquina de escribir con un teclado reducido, las 26 letras mayúsculas y la barra espaciadora. ¿Cuánto tardará en escribir esta frase corta?

La frase tiene 25 caracteres, de forma que supongamos que el mono hace una serie de «tentativas» discretas, consistentes cada una de ellas en 25 golpes de teclado. Si escribe la frase correctamente, es el final del experimento. Si no, le permitiremos otra «tentativa» de 25 caracteres. No conozco ningún mono, pero afortunadamente mi hija de 11 años es un experimentado dispositivo de hacer cosas al azar, y demostró estar muy ansiosa por intervenir en el papel de mono mecanógrafo. Esto es lo que escribió en el ordenador:

UMMK JK CDZZ F ZD DSDSKSM
S SS FMCV PU I DDRGLKDXRRDO
RDTE QDWFDVIOY UDSKZWDCCVYT
H CHVY NMGNBAYTDFCCVD D
RCDFYYYRM N DFSKD LD K WDWK
JJKAUIZMZI UXDKIDISFUMDKUDXI

Ella tuvo que atender otras obligaciones importantes durante ese tiempo, de manera que me vi obligado a programar el ordenador para simular un niño o un mono escribiendo a máquina de una forma aleatoria:

WDLDMNLT DTJBKWIRZREZLMQCO P
Y YVMQKZPGJXWVHGLAWFVCHQYOPY
MWR SWTNUXMLCDLEUBXTQHNZVJQF
FU OVAODVYKDGXDEKYVMOGGS VT
HZQZDSFZIHIVPHZPETPWVOVPMZGF
GEWRGZRPBCTPGQMCKHFDBGW ZCCF

Y así, veces y veces. No es difícil calcular cuánto tendríamos que esperar para que el ordenador (o el niño o el mono), escribiesen al azar METHINKS IS LIKE A WEASEL (CREO QUE PARECE UNA COMADREJA). Hay que pensar en el número total de frases *posibles* con una longitud correcta que el niño, mono u ordenador *podrían* escribir al azar. Es el mismo tipo de cálculo que hicimos para la hemoglobina, y produce un resultado de dimensiones similares. Hay 27 letras posibles (contando el «es-

pacio» como una letra) en la primera posición. La posibilidad de que el mono acierte la primera letra, M es, por tanto, 1 en 27. La posibilidad de que acierte las dos primeras letras, ME es la posibilidad de tener la segunda letra, E correcta (1 en 27), *suponiendo que* tiene también la primera letra, M correcta; por tanto, 1/27 × 1/27, es igual a 1/729. La posibilidad de acertar la primera palabra, METHINGS, es de 1/27 por cada una de las 8 letras; así (1/27) × (1/27) × (1/27)..., etc., 8 veces, o (1/27) elevado a la octava potencia. La posibilidad de tener correcta la frase entera de 29 caracteres es (1/27) elevado a 29, es decir (1/27) multiplicado por sí mismo 29 veces. Estas son probabilidades muy pequeñas, alrededor de 1 en 10 000 millones de millones de millones de millones de millones de millones. Para ponerlo más claro, la frase que buscamos tardaría mucho tiempo en salir, por no hablar de las obras completas de Shakespeare.

Suficiente en cuanto a la selección aleatoria de variaciones en una sola etapa. ¿Qué pasa con la selección cumulativa?; ¿qué tan eficaz resultaría? Mucho más eficaz, quizá más de lo que nos damos cuenta a primera vista, aunque será obvio cuando lo reflejemos con más detalle. Utilicemos de nuevo nuestro ordenador-mono, pero con una diferencia esencial en su programa. Escogiendo de nuevo una secuencia de 28 letras al azar, como antes:

WDLMNLT DTJBKWIRZREZLMQCO P

Ahora «se reproduce» a partir de esta frase fortuita. La duplica repetidamente, pero con la posibilidad de que se produzcan errores aleatorios, «mutaciones», en el proceso. El ordenador examina las frases mutantes sin sentido, la «descendencia» de la frase original, y elige la que más se parece a la frase objetivo METHINGS IS LIKE A WEASEL, *aunque el parecido* sólo sea ligero. En este caso, la frase ganadora de la siguiente «generación» es:

WDLTMNLT DTJBSWIRZREZLMQCO P

¡No hay una mejora obvia! Pero el procedimiento se repite, de nuevo la «descendencia» mutante se «origina a partir de» esta frase, y se elige una nueva «ganadora». Esto sucede generación tras generación. Después de 10 generaciones, la frase elegida como «origen» de la próxima es:

MDLDMNLS ITJISWHRZREZ MECS P

Después de 20 generaciones es:

MELDINLS IT ISWPRKE Z WECSEL

En este momento, la fe nos hace creer que se puede apreciar una semejanza con la frase objetivo. Después de 30 generaciones, ya no hay duda:

METHINGS IT ISWLIKE B WECSEL

La generación número 40 nos conduce a una letra de diferencia con el objetivo:

METHINKS IT IS LIKE I WEASEL

Y el objetivo se alcanza, al fin, en la generación 43. Una segunda tanda del ordenador comienza con la frase:

Y YVMQKZPFJXWVHGLAWFVCHQXYOPY,

pasa a través de (de nuevo se escribe sólo una de cada diez generaciones):

Y YVMQKSPFTXWSHLIKEFV HQYSPY
YETHINKSPITXISHLIKEFA WQYSEY
METHINKS IT ISSLIKE A WEFSEY
METHINKS IT ISBLIKE A WEASES
METHINKS IT ISJLIKE A WEASEO
METHINKS IT IS LIKE A WEASEP

y alcanza la frase objetivo en la generación número 64. En una tercera tanda, el ordenador comienza con:

GEWRGZRPBCTPGQMCKHFDBGW ZCCF

y alcanza METHINKS IS LIKE A WEASEL en 41 generaciones de «producción» selectiva.

El tiempo exacto que tarda el ordenador en alcanzar el objetivo no importa. Si alguien lo quiere saber, la primera vez completó el ejercicio mientras yo estaba comiendo. Tardó una media hora. (Los entusiastas de los ordenadores podrían pensar que esto es extremadamente lento. La razón es que el programa estaba escrito en BASIC, un tipo de habla infantil para un ordenador. Cuando lo volví a escribir en Pascal, tardé 11 segundos.) Los ordenadores son un poco más rápidos en este tipo de cosas

que los monos, pero la diferencia no es realmente significativa. Lo que importa es la diferencia entre el tiempo que tarda la selección *cumulativa*, y el tiempo que el mismo ordenador, trabajando exactamente al mismo ritmo, tardaría en alcanzar la frase objetivo si lo forzáramos a utilizar el procedimiento de *selección en una sola etapa*: alrededor de un millón de millones de millones de millones de millones de años. Esto es más de un millón de millones de millones de veces el tiempo que ha existido el universo hasta la fecha. Realmente sería más justo decir que, comparado con el tiempo que tardaría un mono o un ordenador en escribir la frase buscada, con un programa de combinaciones aleatorias, la edad total del universo hasta la fecha sería sólo una cantidad negligiblemente pequeña, tan pequeña que estaría completamente dentro del margen de error para este tipo de cálculo de papel y lápiz. Por el contrario, el tiempo que tardaría un ordenador en realizar la misma tarea, trabajando con combinaciones aleatorias, pero con las limitaciones de la *selección cumulativa*, es de un orden que los humanos pueden comprender ordinariamente, entre 11 segundos y el tiempo que se tarda en comer.

Existe, entonces, una gran diferencia entre la selección cumulativa (en la que cada mejora, aunque sea mínima, se utiliza como base para una etapa posterior), y la selección en una sola etapa (en la que cada «intento» es algo nuevo). Si el progreso evolutivo hubiese tenido que confiar en la selección en una sola etapa no habría llegado a nada. Sin embargo, si hubiese habido alguna forma por la que las fuerzas ciegas de la naturaleza hubiesen podido erigir las condiciones necesarias para la selección *cumulativa*, las consecuencias podrían haber resultado extrañas y maravillosas. De hecho, es lo que sucedió en este planeta, y nosotros mismos formamos parte de las más recientes, si no las más extrañas y maravillosas, de estas consecuencias.

Es divertido que se puedan leer todavía cálculos como el de la hemoglobina, y se utilicen como si constituyesen argumentos *contra* la teoría de Darwin. La gente que hace esto, con frecuencia expertos en su campo, la astronomía o cualquier otro, parecen creer sinceramente que el darwinismo explica la organización viva sólo en términos de azar: «selección en una sola etapa». Esta creencia, de que la evolución «darwiniana» está hecha «al azar», no es sólo falsa. Es exactamente lo opuesto a la verdad. El azar es un pequeño ingrediente de la receta darwiniana pero el ingrediente más importante es la selección cumulativa, cuya quintaesencia es, precisamente, que *no* está hecha al azar.

Las nubes no pueden participar en el proceso de selección cumulativa. No hay ningún mecanismo por el que las nubes con

formas peculiares puedan engendrar nubes hijas que se parezcan a ellas. Si tal mecanismo existiese, si una nube que se parece a una comadreja o a un camello pudiese dar lugar a una descendencia con, básicamente, la misma forma, la selección cumulativa tendría oportunidad de ponerse en marcha. Por supuesto, las nubes se rompen y forman a veces nubes «hijas», pero esto no es suficiente para la selección cumulativa. También es necesario que la «descendencia» de una nube determinada se parezca a su «progenitor» *más* que a cualquier «progenitor» de la «población». Este punto de vital importancia con frecuencia es mal interpretado por algunos filósofos que, en los últimos años, se han interesado por la teoría de la selección natural. Es necesario, además, que las posibilidades de que una nube determinada sobreviva y engendre copias, dependa de su forma. Puede ser que en alguna galaxia distante se erigiesen estas condiciones, y el resultado fuese, si han transcurrido suficientes millones de años, una forma de vida etérea, hecha de jirones. Ello podría constituir una buena historia de ciencia ficción –que podría titularse *La nube blanca*– pero para nuestros propósitos es más fácil entender un modelo introducido en un ordenador como el modelo mono/Shakespeare.

Aunque el modelo mono/Shakespeare es útil para explicar la distinción entre la selección en una sola etapa y la selección cumulativa, induce a error en algunos puntos importantes. Uno de estos puntos es que, en cada generación de «producción» selectiva, las frases mutantes de la «descendencia» fueron juzgadas de acuerdo con el criterio de semejanza con un objetivo *ideal distante*, la frase METHINKS IT IS LIKE A WEASEL. La vida no es así. La evolución no tiene una finalidad a largo plazo, ni una perfección final que sirva de criterio a la selección, aunque la vanidad humana alimente la absurda noción de que nuestra especie sea el objetivo final de la evolución. En la vida real, el criterio selectivo es siempre a corto plazo, la simple supervivencia o, en términos más generales, el éxito en la reproducción. Si, después de eones, lo que parece ser un progreso hacia algún objetivo distante parece, retrospectivamente, haberse conseguido, se trata en todo caso de una consecuencia casual de muchas generaciones de selección a corto plazo. El «relojero», que es la selección natural cumulativa, es ciego cuando mira hacia el futuro y no tiene ningún objetivo a largo plazo.

Podemos cambiar nuestro modelo en el ordenador tomando en cuenta este punto. Podemos también hacerlo más realista en otros aspectos. Letras y palabras son manifestaciones peculiarmente humanas, de manera que dejemos que el ordenador, en su lugar, haga dibujos. Puede que incluso veamos siluetas con

formas de animales evolucionando en el ordenador, mediante una selección cumulativa de formas mutantes. No debemos prejuzgar el tema creando figuras de animales específicos para comenzar. Queremos que aparezcan únicamente como resultado de una selección cumulativa de mutaciones hechas al azar.

En la vida real, la forma de cada animal individual se produce a través de su desarrollo embrionario. La evolución tiene lugar porque hay ligeras diferencias en este desarrollo, a lo largo de sucesivas generaciones. Estas diferencias se originan debido a la producción de cambios (mutaciones; éste es el pequeño elemento de azar en el proceso, del cual ya traté) en los genes que controlan el desarrollo. En el programa de nuestro modelo, por tanto, debemos tener algo equivalente al desarrollo embrionario, y algo equivalente a los genes que se pueden mutar. Hay muchas formas de reunir estas especificaciones en el programa. Yo escogí una, y la incluí en él. Describiré el programa a continuación, porque pienso que es revelador. Si no se sabe nada sobre ordenadores, sólo hay que recordar que son máquinas que hacen exactamente lo que se les dice, frecuentemente con resultados sorprendentes. La lista de instrucciones que se introducen en un ordenador se denomina programa.

El desarrollo embrionario es un proceso demasiado complejo para simularlo en un ordenador. Tenemos que representarlo con alguna analogía simplificada. Debemos encontrar una regla simple para trazar dibujos que el ordenador pueda obedecer fácilmente, y que pueda variar bajo la influencia de los «genes». ¿Qué normas de dibujo podríamos elegir? Los libros de texto sobre ordenadores suelen ilustrar las posibilidades de lo que llaman programación «repetitiva» utilizando un simple procedimiento de estructura creciente de tipo *arboriforme*. El ordenador comienza dibujando una línea vertical única. Después, la línea se ramifica en dos. Luego, cada una de las dos ramas se divide en dos sub-ramas. Entonces cada una de las sub-ramas se divide en dos sub-sub-ramas y así sucesivamente. Es «repetitiva» porque la misma regla (en este caso, una regla de ramificación) se aplica localmente a toda la estructura arboriforme en crecimiento. No importa cuánto pueda crecer un árbol, la misma regla de ramificación se aplica en las puntas de todas sus ramitas.

La «profundidad» de la repetición significa el número de subsub... ramas que permitimos que crezcan, antes de parar el proceso. La figura 2 muestra qué sucede cuando se le indica al ordenador que obedezca exactamente la misma regla de dibujo, con una profundidad de varios niveles de repetición. Con niveles más elevados, el patrón llega a ser bastante elaborado, pero en la figura 2 puede verse que todavía está producido por una

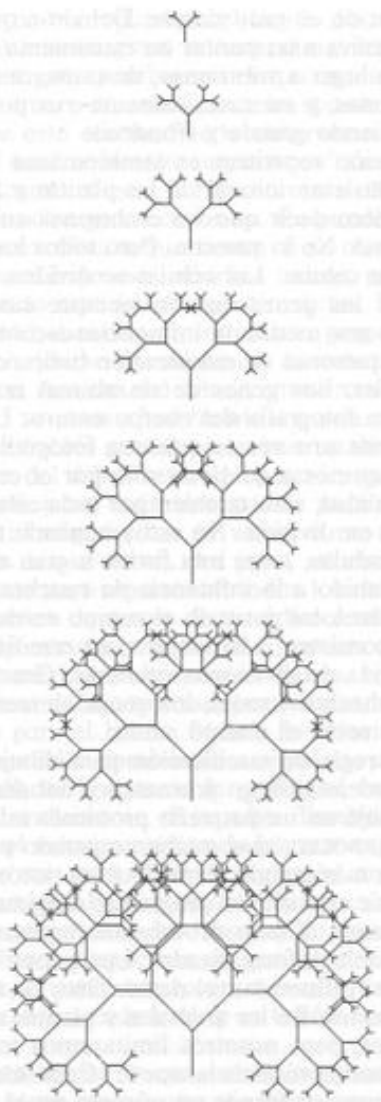


FIGURA 2.

misma regla de ramificación muy simple. Eso es lo que sucede en un árbol real. El patrón de ramificación de un roble o de un manzano parece complejo, pero realmente no lo es. La regla bá-

sica de ramificación es muy simple. Debido a que ésta se aplica de manera repetitiva a las puntas en crecimiento de todo el árbol —las ramas dan lugar a sub-ramas; después, cada sub-rama origina sub-sub-ramas, y así sucesivamente— es por lo que todo el árbol termina siendo grande y frondoso.

La ramificación repetitiva es también una buena metáfora para el desarrollo embrionario de las plantas y los animales, en general. No quiero decir que los embriones animales parezcan árboles con ramas. No lo parecen. Pero todos los embriones crecen por división celular. Las células se dividen siempre en dos células hijas. Y los genes ejercen siempre sus efectos finales sobre el cuerpo por medio de influencias *locales* sobre las células, y sobre los patrones de ramificación bidireccional de la diferenciación celular. Los genes de un animal no son nunca un gran diseño, una fotografía del cuerpo entero. Los genes, como veremos, son más una receta que una fotografía; y una receta, por otra parte, que es seguida *no* sólo por el embrión en desarrollo en su totalidad, sino también por cada célula o cada grupo local de células en división. No estoy negando que el embrión, y más tarde el adulto, *tenga* una forma a gran escala. Pero esta forma *emerge* debido a la influencia de muchos efectos pequeños a nivel celular local por todo el cuerpo en desarrollo, y estos efectos locales consisten, básicamente, en ramificaciones bidireccionales, en forma de divisiones celulares. Gracias a la influencia sobre estos hechos locales, los genes ejercen influencias en último extremo sobre el cuerpo adulto.

Esta simple regla de ramificación para dibujar árboles parece, pues, un modelo análogo prometedor del desarrollo embrionario. La introduje en un pequeño protocolo informatizado, denominado DESARROLLO, que estaba preparado para ser incluido en un programa más grande, llamado EVOLUCIÓN. Como primer paso para escribir este último programa, dirigimos nuestra atención hacia los genes. ¿Cómo deberíamos representar los «genes» en nuestro modelo informatizado? Los genes en la vida real hacen dos cosas. Influencian el desarrollo y se transmiten a las futuras generaciones. En los animales y plantas reales hay miles y miles de genes, pero nosotros limitaremos modestamente el programa de nuestro modelo a nueve. Cada uno de los nueve genes estará representado por un número en el ordenador, que llamaremos su *valor*. El valor de un gen determinado podría ser, por ejemplo, 4, o –7.

¿Como haremos que estos genes tengan influencia sobre el desarrollo? Hay muchas cosas que podrían hacer. La idea básica es que deberían ejercer alguna influencia cuantitativa sobre las reglas de dibujo que constituyen el programa DESARROLLO. Por

ejemplo, un gen podría influenciar el ángulo de ramificación, otro podría influenciar la longitud de una rama determinada. Otra cosa que hace un gen es influenciar la profundidad de la repetición, o sea, el número de ramificaciones sucesivas. Yo hice que el gen 9 tuviese este efecto. Puede observarse la figura 2, por tanto, como un cuadro de siete organismos relacionados, idénticos entre sí, excepto el gen 9. No diré en detalle lo que hace cada uno de los ocho genes restantes. Se puede tener una idea general del *tipo* de efectos que tienen si se observa la figura 3. En el centro del dibujo está el árbol básico, uno de los de la figura 2. Rodeando este árbol hay otros ocho. Todos son iguales al árbol central, excepto en uno de sus genes, un gen distinto en cada árbol, que se ha cambiado: ha «mutado». Por ejemplo, el dibujo a la derecha del árbol central muestra qué sucede cuando el gen 5 se muta añadiéndole +1 a su valor. Si hubiese habido sitio, me habría gustado imprimir un círculo de 18 mutantes alrededor del árbol central. La razón para desear 18 es que hay 9 genes, y así cada uno podría mutarse en dirección «hacia arriba» (añadiendo 1 a su valor) o en dirección «hacia abajo» (restando 1 a su valor). Así pues, un círculo de 18 árboles sería suficiente para representar todos los mutantes unitarios *posibles* que pueden derivarse de un árbol central.

Cada uno de estos árboles tiene su propia «fórmula genética», el valor numérico de sus nueve genes. No he escrito las fórmulas genéticas debajo porque, por sí solas, no tendrían ningún significado para el lector. Sucede lo mismo con los genes reales. Los genes sólo comienzan a significar algo cuando son traducidos, mediante la síntesis de proteínas, en reglas de crecimiento para el embrión en desarrollo. También en el modelo del ordenador, el valor numérico de los nueve genes sólo significa algo cuando son traducidos en reglas de crecimiento del patrón de arborización. Pero se puede tener una idea de lo que hace cada gen *comparando* los cuerpos de dos organismos que se sabe que difieren respecto a un gen determinado. Compárese, por ejemplo, el árbol básico en el centro del dibujo con los dos árboles situados a cada lado, y se tendrá una idea de lo que hace el gen 5.

Esto es exactamente lo que hacen los genetistas en la vida real. No saben cómo ejercen sus efectos los genes sobre los embriones. Tampoco conocen la fórmula genética completa de cualquier animal. Pero comparando los cuerpos de dos animales adultos que se sabe que *difieren* en un gen, pueden ver qué efectos tiene ese gen único. En realidad, es más complicado, puesto que los efectos de los genes interaccionan entre sí de forma que es algo más complejo que una simple adición. Lo mismo es exac-

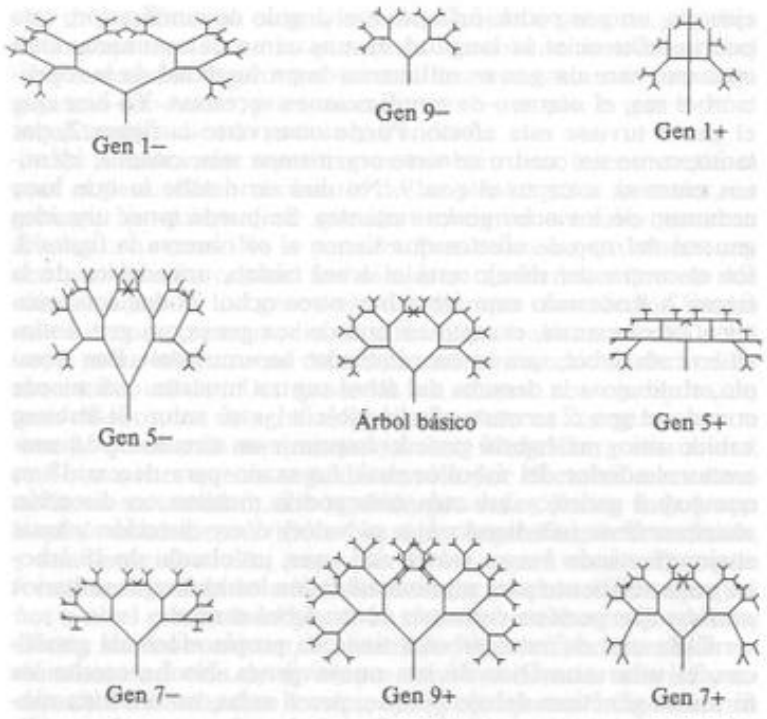


FIGURA 3.

tamente cierto en los árboles del ordenador. Mucho, como lo demostrarán los dibujos posteriores.

Se observará que todas las formas son simétricas izquierda/derecha respecto a un eje. Ésta es una limitación que impuse en el protocolo del programa DESARROLLO. Lo hice, en parte, por razones estéticas; en parte, para economizar en el número de genes necesarios (si los genes no ejercieran un efecto de imagen en espejo sobre los dos lados del árbol, necesitaríamos genes separados para el lado derecho y el izquierdo); y, en parte, porque estaba esperando que evolucionasen formas de tipo animal, y muchos cuerpos animales son bastante simétricos. Por la misma razón, dejaré de llamar a estas criaturas «árboles», y las llamaré «cuerpos» o «bioformas». Bioforma es el nombre acuñado por Desmond Morris para describir las formas vagamente similares a animales en sus pinturas surrealistas. Estas pinturas tienen para mí un especial valor afectivo, porque una de ellas fue reproducida en la cubierta de mi primer libro. Desmond Morris afirma que sus bioformas «evolucionaron» en su mente, y que su evolución puede seguirse a través de cuadros sucesivos.

Volvamos a las bioformas del ordenador, y al círculo de las 18 mutantes posibles, ocho de las cuales aparecen dibujadas en la figura 3. Como cada miembro del círculo está a sólo un escalón mutacional de distancia de la bioforma central, es fácil para nosotros verlas como sus *hijas*. Tenemos nuestro análogo de REPRODUCCIÓN, que, como DESARROLLO, podemos introducirlo en otro pequeño programa, listo para incluirlo en nuestro gran programa, llamado EVOLUCIÓN. Hay que resaltar dos cosas sobre REPRODUCCIÓN. Primero, no hay sexos; la reproducción es asexual. Pienso en las bioformas como hembras, porque los animales asexuales, como la mosca verde, son casi siempre básicamente hembras en su forma. Segundo, mis mutaciones están limitadas a producirse una cada vez. Una hija difiere de su progenitor sólo en uno de los nueve genes; además, todas las mutaciones se producen añadiendo +1 o –1 al valor del gen parental correspondiente. Estas son simplemente reglas arbitrarias: podrían haber sido diferentes y todavía seguir siendo realistas desde un punto de vista biológico.

Esto mismo no es cierto para la siguiente característica del modelo, que incluye un principio fundamental de la biología. La forma de cada hija no se deriva directamente de la forma de su progenitor. Cada hijo obtiene su forma a partir de los valores de sus nueve genes (que tienen influencia sobre los ángulos, distancias, etc.). Cada hija obtiene sus nueve genes a partir de los nueve genes de su progenitor. Es justamente lo que sucede en la vida real. Los cuerpos no se transmiten a través de las generaciones, los genes sí. Los genes tienen influencia sobre el desarrollo embrionario del cuerpo en el que están situados. Después, esos mismos genes pueden ser transmitidos a la generación siguiente, o no. Su naturaleza no resulta afectada por su participación en el desarrollo corporal, pero su posibilidad de ser transmitidos sí puede resultar afectada por el éxito del cuerpo que ayudaron a crear. Es por ello por lo que, en el modelo informatizado, es importante que los dos protocolos denominados DESARROLLO y REPRODUCCIÓN estén escritos como dos compartimentos estancos. Son estancos excepto en el hecho de que REPRODUCCIÓN transmite valores de genes a DESARROLLO, donde influencian las reglas de crecimiento. DESARROLLO no transmite de una manera enfática valores de genes de vuelta hacia REPRODUCCIÓN; lo que sería equivalente al «lamarquismo» (véase el capítulo 11).

Posteriormente, unimos los dos programas modulares, desig-

nados DESARROLLO y REPRODUCCIÓN. Este último transmite genes a otras generaciones posteriores, con la posibilidad de sufrir mutaciones. DESARROLLO toma los genes facilitados por REPRODUCCIÓN a una generación determinada, y los traduce en una acción de dibujar, y de aquí en el dibujo de un cuerpo en la pantalla del ordenador. Ha llegado el momento de poner estos módulos juntos en el gran programa llamado EVOLUCIÓN.

EVOLUCIÓN consiste básicamente en una repetición sin fin de REPRODUCCIÓN. En cada generación, REPRODUCCIÓN recoge los genes suministrados por la generación anterior, y los entrega a la generación siguiente, pero con pequeños errores al azar: mutaciones. Una mutación consiste simplemente en sumar +1 o −1 al valor de un gen escogido al azar. Esto significa que, según avanzan las generaciones, la magnitud de la diferencia genética con el antepasado original puede llegar a ser muy grande, de una manera cumulativa, a razón de un pequeño escalón cada vez. Pero, aunque las mutaciones estén hechas al azar, el cambio acumulativo a lo largo de las generaciones no lo está. Los descendientes de cualquier generación son diferentes de sus progenitores y siguen direcciones al azar. Pero la decisión de cuál de esos descendientes resultará seleccionado para avanzar hacia la generación siguiente no está hecha al azar. Es aquí donde interviene la selección darwiniana. El criterio para la selección no son los propios genes, sino los cuerpos cuya forma está influenciada por los genes a través de DESARROLLO.

Además de ser REPRODUCIDOS, los genes en cada generación son también entregados a DESARROLLO, que hace crecer en la pantalla el cuerpo apropiado, siguiendo sus propias reglas estrictamente establecidas. En cada generación, se despliega una «camada» entera de «crías» (individuos de la generación siguiente). Todas estas crías son crías mutantes del mismo progenitor, cada una de las cuales se diferencia de él con respecto a un gen. Esta elevada tasa de mutación es una característica, no biológica, del modelo informático. En la vida real, la probabilidad de que un gen sufra una mutación es con frecuencia menos de una en un millón. La razón para establecer esta elevada tasa de mutación en el modelo es que la representación completa en la pantalla del ordenador es para beneficio de los ojos humanos, y los humanos no tienen paciencia para esperar un millón de generaciones para cada mutación.

El ojo humano tiene un papel activo que representar en esta historia. Es el agente seleccionador. Inspecciona la camada de descendientes y escoge uno para que se reproduzca. El elegido se transforma entonces en el progenitor de la generación siguiente, desplegándose simultáneamente en la pantalla una camada

de *sus* crías mutantes. El ojo humano está haciendo aquí exactamente lo que hace cuando cría perros de raza o flores para exponer. Nuestro modelo, en otras palabras, es un modelo de selección estrictamente artificial, no de selección natural. El criterio de «éxito» no es el criterio directo de supervivencia, como lo es en la selección natural. En la verdadera selección natural, si un cuerpo tiene lo que necesita para sobrevivir, sus genes sobreviven automáticamente porque están dentro. De forma que los genes que sobreviven tienden a ser, automáticamente, aquellos que confieren a los cuerpos las cualidades que les ayudan a sobrevivir. En el modelo informático, por otra parte, el criterio de selección no es la supervivencia, sino la capacidad de interesar a la fantasía humana. Una fantasía eventual, no necesariamente ociosa, ya que decidimos seleccionar de forma consistente alguna cualidad, como la «semejanza con un sauce llorón». En mi experiencia, sin embargo, el seleccionador humano es con mucha frecuencia caprichoso y oportunista. En esto tampoco difiere de ciertas formas de selección natural.

La persona indica al ordenador qué miembro de la generación actual de descendientes debe reproducirse. Los genes del elegido se transmiten a REPRODUCCIÓN, y comienza una nueva generación. Este proceso, como la evolución en la vida real, continúa de manera indefinida. Cada generación de bioformas está a sólo un escalón mutacional de distancia de su predecesor y de su sucesor. Pero después de 100 generaciones de EVOLUCIÓN, las bioformas pueden parecer cualquier cosa que se diferencie hasta 100 escalones mutacionales de su ancestro original. Y en 100 escalones mutacionales pueden suceder muchas cosas.

Nunca soñé *tanto* como cuando empecé a jugar con mi programa EVOLUCIÓN recién escrito. La primera cosa que me sorprendió fue que las bioformas pueden dejar de parecer árboles muy rápidamente. La estructura básica de ramificación en dos está presente siempre, pero desaparece con facilidad según van cruzándose y entrecruzándose las líneas, formando masas sólidas de colores (blanco y negro en las fotografías). La figura 4 muestra una historia evolutiva determinada, que consta de menos de 29 generaciones. Su antepasado común es una criatura diminuta, un punto. Aunque su cuerpo sea sólo un punto, igual que una bacteria en el magma primitivo, oculta en su interior el potencial para ramificarse exactamente con el patrón del árbol central de la figura 3: sólo que su gen 9 le ordena ramificarse ¡0 veces! Todas las criaturas dibujadas son descendientes del punto, pero, para evitar atiborrar la página, no imprimí todas las que vi; sólo las crías seleccionadas en cada generación (esto es, el progenitor de la siguiente generación) y una o dos de sus in-

fructuosas hermanas. Así pues, el dibujo muestra, básicamente, sólo la línea principal de evolución, guiada por mi selección estética. Aquí se exhiben todos los estadios de la línea principal.

Vayamos brevemente a través de las primeras generaciones de la línea principal de evolución en la figura 4. El punto se convierte en una Y en la generación 2. En las dos generaciones siguientes, la Y se hace más grande. Luego las ramas se tornan ligeramente curvas, como un tirachinas bien hecho. En la generación 7, la curva es tan acentuada, que las dos ramas casi se tocan. Las ramas curvadas se hacen más grandes, y cada una adquiere un par de pequeños apéndices en la generación 8. En la generación 9 estos apéndices se pierden de nuevo, y el tronco del tirachinas se hace más largo. La generación 10 parece una sección a través de una flor; las ramas laterales curvadas parecen pétalos formando un cáliz alrededor de un apéndice central o «estigma». En la generación 11, la misma forma de «flor» se ha hecho más grande y ligeramente más compleja.

No seguiré con la narración. El dibujo habla por sí mismo, en cada una de las 29 generaciones. Obsérvese cómo cada generación se diferencia sólo un poco de su progenitor y de sus hermanas. Al ser cada una sólo un poco diferente de sus padres, se espera que sólo se diferencie un poco *más* de sus abuelos (y sus nietos) y algo más de sus bisabuelos (y biznietos). En esto consiste la evolución *cumulativa*, aunque, debido a nuestra elevada tasa de mutación, la hemos acelerado hasta alcanzar un ritmo irreal. Por eso, la figura 4 parece más un árbol genealógico de *especies* que de individuos, pero el principio es el mismo.

Cuando escribí el programa, nunca pensé que evolucionaría hacia algo más que una variedad de dibujos arboriformes. Yo esperaba encontrar sauces llorones, cedros del Líbano, álamos de Lombardía, algas marinas, quizá cuernos de venado. Nada relacionado con mi intuición de biólogo, nada en mis veinte años de experiencia programando ordenadores, y nada en mis sueños más salvajes, me había preparado para ver lo que surgió en realidad de la pantalla. No puedo recordar exactamente en qué punto de la secuencia comencé a ver que era posible la evolución de algo parecido a un insecto. Bajo esta presunción incontrolada, comencé a seguir el desarrollo, generación tras generación, de cualquier cría que se pareciese a un insecto. Mi incredulidad creció paralelamente con la evolución del parecido. Los resultados finales se observan en la parte inferior de la figura 4. Hay que admitir que tienen ocho patas como una araña, en lugar de seis, como un insecto, ¡pero aun así! No puedo ocultar el alborozo que sentí cuando descubrí estas criaturas exquisitas surgiendo ante mis ojos. Oí claramente los violines triunfales de la

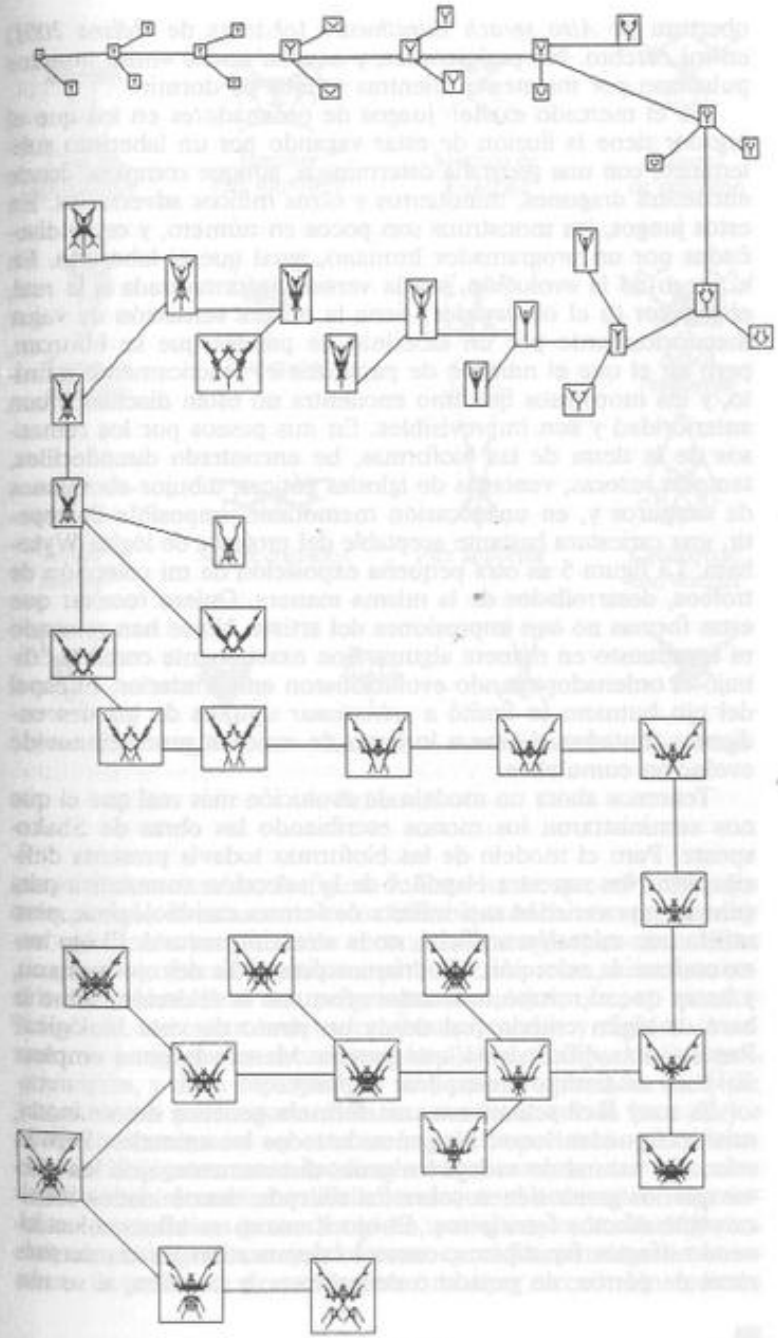


FIGURA 4.

obertura de *Also sprach Zarathustra* (el tema de *Odisea 2001*) en mi cerebro. No pude comer, y aquella noche «mis» insectos pulularon por mi mente mientras trataba de dormir.

En el mercado existen juegos de ordenadores en los que el jugador tiene la ilusión de estar vagando por un laberinto subterráneo, con una geografía determinada, aunque compleja, donde encuentra dragones, minotauros y otros míticos adversarios. En estos juegos, los monstruos son pocos en número, y están diseñados por un programador humano, igual que el laberinto. En el juego de la evolución, sea la versión informatizada o la real, el jugador (o el observador) tiene la misma sensación de vagar metafóricamente por un laberinto de pasajes que se bifurcan, pero en el que el número de pasadizos es prácticamente infinito, y los monstruos que uno encuentra no están diseñados con anterioridad y son imprevisibles. En mis paseos por los remansos de la tierra de las bioformas, he encontrado duendecillos, templos aztecas, ventanas de iglesias góticas, dibujos aborígenes de canguros y, en una ocasión memorable, imposible de repetir, una caricatura bastante aceptable del profesor de lógica Wykeham. La figura 5 es otra pequeña exposición de mi colección de trofeos, desarrollados de la misma manera. Quiero recalcar que estas formas no son impresiones del artista. No se han retocado ni compuesto en manera alguna. Son exactamente como las dibujó el ordenador cuando evolucionaron en su interior. El papel del ojo humano se limitó a *seleccionar* algunos de los descendientes mutados al azar a lo largo de muchas generaciones de evolución cumulativa.

Tenemos ahora un modelo de evolución más real que el que nos suministraron los monos escribiendo las obras de Shakespeare. Pero el modelo de las bioformas todavía presenta deficiencias. Nos muestra el poder de la selección cumulativa para generar una variedad casi infinita de formas casi-biológicas, pero utiliza una selección artificial, no la selección natural. El ojo humano hace la selección. ¿Podríamos prescindir del ojo humano, y hacer que el mismo ordenador efectuase la selección, sobre la base de algún criterio real desde un punto de vista biológico? Resulta más difícil de lo que parece. Merece la pena emplear un poco de tiempo en explicar el porqué.

Es muy fácil seleccionar una fórmula genética determinada, mientras puedan leerse los genes de todos los animales. Pero la selección natural no escoge los genes directamente, sino los *efectos* que los genes tienen sobre los cuerpos, denominados técnicamente efectos fenotípicos. El ojo humano es eficaz seleccionando efectos fenotípicos, como lo demuestran las numerosas razas de perros, de ganado o de palomas, y también, si se me

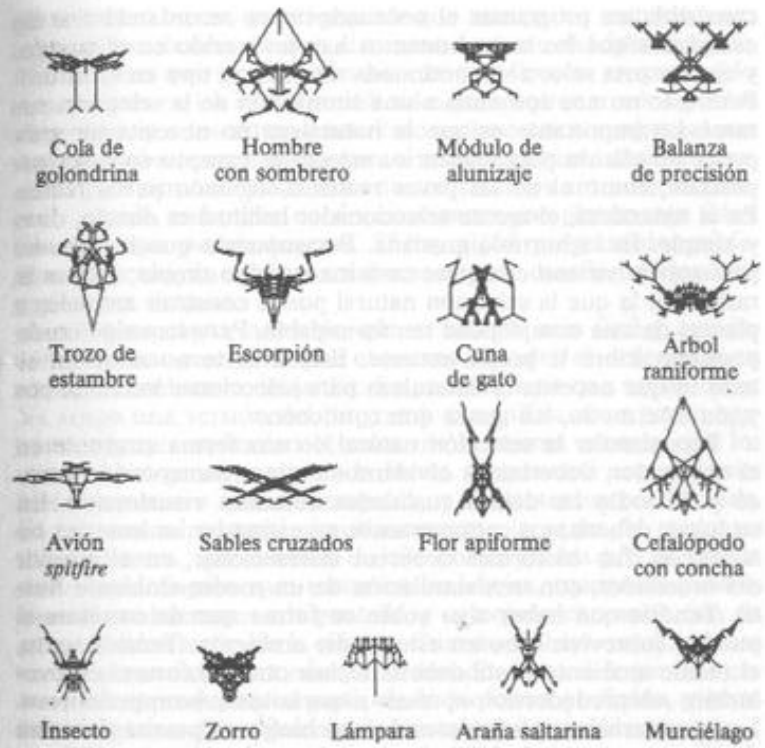


FIGURA 5.

permite mencionarla, la figura 5. Para hacer que el ordenador seleccionase directamente estos efectos, tendríamos que escribir un sofisticado programa de reconocimiento de patrones. Estos programas existen. Se utilizan para leer impresos, e incluso escritura manual. Pero son programas complejos, que, en su estado actual, necesitan ordenadores muy grandes y rápidos. Aunque ese programa no estuviese más allá de mi capacidad de programación, y de la capacidad de mi pequeño ordenador de 64 K, tampoco me preocuparía. Ésta es una tarea que la hace mejor el ojo humano, con —y esto es lo más importante— el ordenador de 10 giganeuronas localizado en el cerebro.

No sería demasiado difícil hacer que el ordenador seleccionase características generales como, por ejemplo, la relación alto-delgado, bajo-gordo, o quizá formas curvadas, puntiagudas, o incluso la presencia de ornamentos de tipo rococó. Un método

consistiría en programar el ordenador para recordar el *tipo* de cualidades que los seres humanos han favorecido en el pasado, y ejercer una selección continuada del mismo tipo en el futuro. Pero esto no nos aproxima a una simulación de la selección *natural*. Lo importante es que la naturaleza no necesita un gran poder de cálculo para realizar su selección, excepto en casos especiales, como el de las pavas reales escogiendo pavos reales. En la naturaleza, el agente seleccionador habitual es directo, duro y simple. Es la horrible guadaña. Por supuesto que las *razones* para sobrevivir son cualquier cosa menos algo simple; ésta es la razón por la que la selección natural puede construir animales y plantas de una complejidad tan formidable. Pero hay algo crudo y simple sobre la propia muerte. Esta muerte no aleatoria es todo lo que necesita la naturaleza para seleccionar los fenotipos y, de este modo, los genes que contienen.

Para simular la selección natural de una forma atrayente en el ordenador, deberíamos olvidarnos de la ornamentación rococó y de todas las demás cualidades definidas visualmente. En su lugar, deberíamos concentrarnos en estimular las muertes no aleatorias. Las bioformas deberían interaccionar, en el interior del ordenador, con una simulación de un medio ambiente hostil. Tendría que haber algo sobre su forma que determinase si pueden sobrevivir o no en este medio ambiente. Teóricamente, el medio ambiente hostil debería incluir otras bioformas en evolución: «depredadores», «presas», «parásitos», «competidores». Las características particulares de una bioforma precisa deberían determinar su vulnerabilidad a ser capturada, por ejemplo, por determinadas bioformas depredadoras. Los criterios de vulnerabilidad no deberían ser determinados por el programador. Deberían *surgir*, de la misma manera que surgen las propias formas. Despegaría así la evolución en el computador, ya que se encontrarían las condiciones adecuadas para una «carrera de armamentos» autorreforzada (véase capítulo 7), y no me atrevo a especular dónde terminaría. Desgraciadamente, pienso que la composición de este falso mundo probablemente esté más allá de mis facultades de programador.

Si alguien está lo suficientemente preparado para hacerlo, serían los programadores que desarrollan esos juegos ruidosos y vulgares de las máquinas de recreo: sucedáneos de los Invasores del Espacio. En estos programas se simula un mundo contrahecho. Tiene una geografía, a menudo en tres dimensiones, y también una dimensión temporal que se mueve con rapidez. Los distintos objetos se elevan rápidamente en un espacio tridimensional simulado, chocando entre ellos, derribándose, o engulléndose entre ruidos escandalosos. La simulación puede llegar a ser tan buena que el jugador que maneja los mandos tenga la poderosa ilusión de que él mismo es parte del falso mundo. Me imagino que lo más avanzado de este tipo de programación se consigue en las cámaras utilizadas para entrenar a los pilotos de aviones y a los astronautas. Pero incluso estos programas son una pequeñez, comparados con el programa que habría que escribir para simular una carrera de armamentos entre depredadores y presas, imbuidos en un ecosistema completamente falso. Sin embargo, podría hacerse. Si hay algún programador profesional por ahí, que quiera colaborar en este desafío, me gustaría recibir sus noticias.

Mientras tanto, hay algo que es mucho más fácil y que intento realizar cuando llegue el verano. Pondré el ordenador en un lugar sombreado del jardín. La pantalla tiene que ser de color. Ya tengo una versión del programa que utiliza unos pocos «genes» más que controlan el color, de la misma manera que los otros nueve genes controlan la forma. Comenzaré con cualquier bioforma más o menos compacta, y brillantemente coloreada. El ordenador mostrará simultáneamente la gama de mutantes descendientes, que difieren de ella por su forma y/o su patrón de colores. Espero que entonces las abejas, mariposas y otros insectos se acerquen a la pantalla, y «escojan» chocando con un punto determinado de la misma. Cuando se haya producido un cierto número de elecciones, el ordenador borrará la pantalla entera, «se reproducirá» a partir de la bioforma preferida, y mostrará la generación siguiente de mutantes descendientes.

Tengo muchas esperanzas de que, a lo largo de un gran número de generaciones, los insectos produzcan realmente una evolución de las flores en el ordenador. Si lo hacen, estas flores habrán evolucionado exactamente bajo la misma presión selectiva que las flores reales en los campos silvestres. Estoy esperanzado por el hecho de que los insectos se acercan con frecuencia a los estampados de colores de los vestidos de las mujeres (también hay experimentos sistemáticos publicados). Otra posibilidad, que encontraría aún más excitante, es que los insectos salvajes pudiesen ser la causa de la evolución de formas insectiformes. Un hecho precedente —y de aquí la razón de mi esperanza— es que en el pasado las abejas produjeron la evolución de las orquídeas-abejas. Las abejas macho, a lo largo de muchas generaciones de evolución cumulativa de las orquídeas, produjeron una especie apiforme al tratar de copular con ciertas flores, y transportar el polen. Imaginemos la «flor-abeja» de la figura 5 en color. ¿No se encapricharía uno si fuese una abeja?

El motivo principal para el pesimismo es que la visión de los insectos funciona de una forma muy diferente a la nuestra.

Las pantallas de televisión están diseñadas para los ojos humanos, y no para los de las abejas. Esto podría significar que, aunque nosotros y las abejas veamos las orquídeas-abejas con la misma forma, aunque de manera muy distinta, las abejas puede que no vean las imágenes de la pantalla de televisión de ninguna manera. Podría ser que las abejas no vieran otra cosa que las i625 líneas de barrido! Aun así, vale la pena intentarlo. Para cuando este libro esté publicado, ya sabré la respuesta.

Hay un dicho popular, expresado en tonos que Stephen Potter habría llamado «contundentes», que dice que no se puede sacar de los ordenadores más de lo que se ha introducido. Otra versión es que los ordenadores sólo hacen exactamente lo que se les ordena, y que, por tanto, no son creativos. Este dicho es cierto sólo en un sentido muy trivial, el mismo por el que Shakespeare nunca habría escrito nada excepto lo que le enseñó a escribir su primer maestro: palabras. Yo programé EVOLUCIÓN en el ordenador, pero no planifiqué «mis» insectos, ni el escorpión, ni el «spitfire», ni el alunizador. No tenía el más ligero indicio de lo que emergería, motivo por el cual «emerger» es la palabra correcta. Es cierto que mis ojos hicieron la selección que guió su evolución, pero en cada estadio yo estaba limitado a un pequeño puñado de descendientes ofrecidos por la actuación de las mutaciones al azar, y mi «estrategia» de selección fue oportunista, caprichosa y a corto plazo. Yo no apuntaba hacia un objetivo a largo plazo, como tampoco hace la selección natural.

Puedo dramatizar esto explicando una ocasión en la que *traté* de conseguir un objetivo a largo plazo. Primero, debo hacer una confesión. Aunque todos lo habrán adivinado. La historia evolutiva de la figura 4 es una reconstrucción. No fue la primera vez que vi «mis» insectos. Cuando emergieron por primera vez al sonido de las trompetas, no tenía medios para registrar sus genes. Estaban allí, en la pantalla del ordenador, pero no podía llegar a ellos, no podía descifrar sus genes. Esperé antes de apagar el ordenador mientras exprimía mi cerebro, tratando de pensar alguna forma de almacenarlos, pero no había ninguna. Los genes estaban enterrados muy profundamente, como lo están en la vida real. Pude imprimir dibujos de los cuerpos de los insectos, pero había perdido sus genes. De inmediato, modifiqué el programa, de manera que en el futuro los registros de las fórmulas genéticas fuesen accesibles, pero ya era demasiado tarde. Había perdido mis insectos.

Traté de «encontrarlos» otra vez. Si habían evolucionado una vez, parecía posible que evolucionaran de nuevo. La idea me obsesionaba, como un acorde olvidado. Vagué por la Tierra de las Bioformas, moviéndome a través de un paisaje infinito de

cosas y criaturas extrañas, pero no pude encontrar mis insectos. Sabía que debían de estar acechando en algún lugar. Conocía los genes a partir de los que había comenzado la evolución original. Tenía un dibujo de sus cuerpos. Incluso tenía un cuadro de la secuencia evolutiva que conducía hasta mis insectos, lenta y gradualmente, desde un primer antepasado, que consistía en un punto. Pero no conocía su fórmula genética.

Podría pensarse que sería fácil reconstruir la trayectoria evolutiva, pero no lo fue. La razón, a la que volveré más adelante, es el número astronómico de bioformas *posibles* que ofrece una trayectoria evolutiva suficientemente larga, aun cuando sólo varíen nueve genes. Varias veces en mi peregrinaje por la Tierra de las Bioformas, me pareció que me acercaba a un precursor de mis insectos pero, luego, a pesar de todos mis esfuerzos como agente seleccionador, la evolución se alejó de lo que demostró ser una pista falsa. Con el tiempo, durante mis paseos por la Tierra de las Bioformas —la sensación de triunfo fue casi la misma que en la primera ocasión— los acorralé de nuevo. No supe (y aún no sé) si estos insectos eran exactamente los mismos insectos originales, «los acordes perdidos de Zaratustra», o si eran superficialmente «convergentes» (véase el capítulo siguiente), pero eran suficientemente buenos. Esta vez no hubo error: escribí la fórmula genética, y ahora puedo «hacer evolucionar» los insectos siempre que quiero.

Sí, ya sé que estoy exagerando un poco el drama, pero hay que insistir en un punto bastante serio. Aun cuando fui yo quien programó el ordenador, diciéndole lo que tenía que hacer con gran detalle, sin embargo no planifiqué los animales que evolucionaron, y que me sorprendieron totalmente cuando vi a sus precursores por primera vez. Me encontraba tan impotente para controlar la evolución que, aunque quise volver a trazar una trayectoria evolutiva determinada, resultó casi imposible hacerlo. No creo que hubiese encontrado mis insectos de nuevo, si no hubiese tenido un dibujo impreso de sus predecesores evolutivos, e incluso así fue difícil y tedioso. ¿No resulta paradójica la impotencia del programador para controlar o predecir el curso de la evolución? ¿Significa que está sucediendo algo misterioso o místico dentro del ordenador? Por supuesto que no. No hay tampoco nada místico que intervenga en la evolución real de los animales y plantas. Podemos utilizar el modelo del ordenador para resolver esta paradoja, y aprender algo en el proceso sobre la evolución real.

Para anticipar algo, el fundamento de la resolución de esta paradoja es como sigue. Existe un conjunto definido de bioformas, cada una localizada de manera permanente en un sitio pro-

pio y único dentro de un espacio matemático. Está allí localizada permanentemente en el sentido que, si se conociese su fórmula genética, podría encontrarse al instante; sus vecinos dentro de este espacio especial son las bioformas que se diferencian de ella en un solo gen. Ahora que conozco la fórmula genética de mis insectos, puedo reproducirlos a voluntad, y puedo indicarle al ordenador que «evolucione» hasta ellos desde cualquier punto de partida. Cuando se produce por primera vez la evolución de una criatura por selección artificial en el modelo del ordenador, se tiene la sensación de estar realizando un proceso creativo. Por supuesto que lo es. Pero lo que se está haciendo, en realidad, es *encontrar* a esta criatura, que ya está localizada, en sentido matemático, en su sitio en el espacio genético de la Tierra de las Bioformas. La razón por la que resulta, en verdad, un proceso creativo es que encontrar una criatura determinada es extremadamente difícil, simplemente porque la Tierra de las Bioformas es muy grande, y el número total de criaturas allí presentes es casi infinito. No se puede buscar sólo al azar, sin un objetivo. Hay que adoptar algún procedimiento de búsqueda más eficiente, o sea, creativo.

Algunas personas creen que los ordenadores que juegan al ajedrez lo hacen calculando internamente todas las combinaciones posibles de los movimientos de las piezas. Encuentran esta idea reconfortante cuando les gana el ordenador, pero es completamente falsa. Las piezas de ajedrez pueden realizar demasiados movimientos: el espacio de búsqueda tiene una dimensión de miles de millones de posibilidades como para permitir encontrar un éxito a ciegas. El arte de escribir un buen programa de ajedrez consiste en discurrir atajos eficientes a través de este espacio. La selección cumulativa, sea artificial, como en el modelo del ordenador, o natural, como en el mundo real, es un procedimiento eficiente de búsqueda, y sus consecuencias se parecen mucho a las de una inteligencia creadora. Ésta es, después de todo, la base del Argumento del Diseño de William Paley. Técnicamente, lo único que hacemos, cuando jugamos con el programa de las bioformas, es *encontrar* animales que, en un sentido matemático, están esperando que se los encuentre. Lo que sentimos, sin embargo, es una especie de proceso de creación artística. Cualquier búsqueda dentro de un espacio pequeño, que contenga unas pocas entidades aisladas, no se percibe como un proceso creativo. Los juegos infantiles que consisten en buscar objetos no parecen creativos. Mezclar cosas al azar, esperando encontrar un objeto buscado, funciona cuando el espacio de búsqueda es pequeño. Pero según va creciendo este espacio, se hacen necesarios unos procedimientos de búsqueda

más y más sofisticados. Cuando el espacio de búsqueda es *suficientemente* grande, un método eficaz de búsqueda llega a ser indistinguible de la verdadera creatividad.

Los modelos biomórficos del ordenador reúnen todos estos puntos, y constituyen un puente instructivo entre los procesos creativos humanos, como planificar una estrategia ganadora en el ajedrez, y la creatividad evolutiva de la selección natural, el relojero ciego. Para verlo mejor, debemos desarrollar la idea de que la Tierra de las Bioformas es un «espacio» matemático, una visión infinita, aunque ordenada, de la variedad morfológica, en un espacio en el que cada criatura está colocada en su sitio correcto, esperando que se la descubra. Las 17 criaturas de la figura 5 no están colocadas con un orden especial. Pero en la Tierra de las Bioformas cada una ocupa su propia posición única, determinada por su fórmula genética, y rodeada de unos vecinos determinados. Todas las criaturas en la Tierra de las Bioformas tienen una relación espacial definida entre sí. ¿Qué significa? ¿Qué significado podemos dar a la posición espacial?

El espacio del que estamos hablando es el espacio genético. En él, cada animal tiene su propia posición. Los vecinos cercanos son aquellos animales que se diferencian entre sí por una mutación única. En la figura 3, el árbol básico del centro está rodeado por 8 de sus 18 vecinos inmediatos en el espacio genético. Los 18 vecinos de un animal son los 18 tipos de descendientes que puede originar, y los 18 tipos de progenitores de los cuales podría proceder, dadas las reglas del modelo de nuestro ordenador. Dentro de un grado de parentesco, cada animal tendría 324 vecinos (18×18, ignorando por simplicidad las mutaciones retrógradas), el conjunto de nietos, abuelos, tíos o sobrinos posibles. Dentro de un nuevo grado de parentesco, cada animal tendría 5 832 vecinos ($18 \times 18 \times 18$), el conjunto de biznietos, bisabuelos, primos carnales, etc., posibles.

¿Cuál es la intención al pensar en términos de espacio genético? ¿Hacia dónde nos lleva? La respuesta es que nos facilita una forma de comprender la evolución como un proceso gradual, acumulativo. Dentro de cualquier generación, de acuerdo con las reglas del modelo del ordenador, sólo es posible moverse un paso a través del espacio genético. En 29 generaciones no es posible moverse a más de 29 pasos de distancia del antepasado original. Cada historia evolutiva constituye una vía o trayectoria determinada, a través de este espacio genético. Por ejemplo, la historia evolutiva registrada en la figura 4 es una trayectoria concreta en desarrollo a través del espacio genético, que conecta un punto con un insecto, pasando por 28 estadios in-

termedios. Esto es lo que quiero decir cuando hablo metafóricamente de «vagar» por la Tierra de las Bioformas.

Quería tratar de representar este espacio genético con un dibujo. El problema es que los dibujos tienen dos dimensiones. El espacio genético en el que se asientan las bioformas no es un espacio bidimensional. No es, ni siquiera, un espacio tridimensional; es un espacio que tendría 9 dimensiones. (Lo importante a recordar sobre las matemáticas es que no hay que asustarse. No son tan difíciles como pretenden, a veces, sus grandes sacerdotes. Siempre que me siento intimidado, recuerdo la frase de Silvanus Thompson en su *Calculus Made Easy* [El cálculo simplificado]: «Lo que puede hacer un loco, lo puede hacer otro.») Si pudiéramos dibujar un espacio genético con nueve dimensiones, podríamos hacer que cada una se correspondiera con uno de los nueve genes. La posición de un animal concreto, por ejemplo, un escorpión o un murciélago o un insecto, vendría determinada por el valor numérico de sus nueve genes. Los cambios evolutivos consistirían en caminar paso a paso a través de este espacio. La diferencia existente entre dos animales y, por tanto, el tiempo empleado en evolucionar, y la dificultad para evolucionar de uno a otro, se mediría como la distancia entre ambos dentro de este espacio de nueve dimensiones.

¡Ay!, no podemos dibujar en nueve dimensiones. Traté de arreglarlo, trazando un dibujo en dos dimensiones, que me condujera hacia algo que pudiera percibirse como un movimiento punto por punto en el espacio genético de nueve dimensiones de la Tierra de las Bioformas. Hay varias formas posibles de hacer esto, y escogí una que llamo el truco del triángulo. Obsérvese la figura 6. En los tres ángulos del triángulo hay tres bioformas escogidas de manera arbitraria. La de la parte superior es el árbol básico; la de la izquierda, uno de «mis» insectos, y la de la derecha no tiene nombre pero pensé que era muy bonita. Como todas las bioformas, cada una de estas tres tiene su propia fórmula genética, que determina su posición única en el espacio genético de nueve dimensiones.

El triángulo descansa en un «plano» bidimensional que corta el hipervolumen de nueve dimensiones (lo que puede hacer un loco, lo puede hacer otro). El plano sería como un trozo de cristal clavado en un trozo de gelatina. En el cristal está dibujado el triángulo, y también algunas de las bioformas cuyas fórmulas genéticas les da derecho a asentarse sobre este plano en particular. ¿Qué es lo que les da derecho? Aquí es donde entran en acción las tres bioformas situadas en los ángulos del triángulo. Son las denominadas bioformas de situación.

Hay que recordar que toda la idea de «distancia» en el «es-

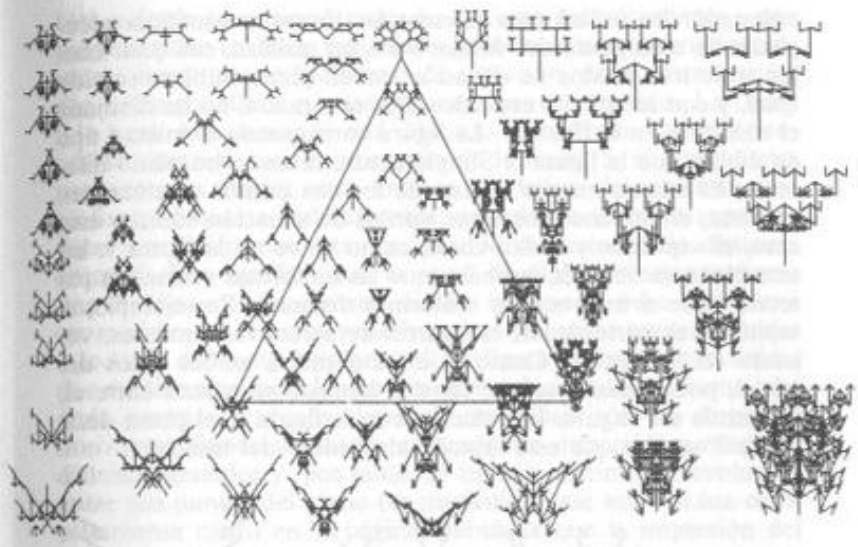


FIGURA 6.

pacio» genético descansa en el hecho de que las bioformas genéticamente similares son vecinas cercanas, y las bioformas genéticamente diferentes lo son lejanas. En este plano concreto, todas las distancias están calculadas con referencia a las tres bioformas de situación. Para cualquier punto situado en la lámina de cristal, esté dentro o fuera del triángulo, su fórmula genética se calcula como una «media compensada» de las fórmulas genéticas de las tres bioformas de situación. Probablemente, el lector ya habrá adivinado cómo se hace esta compensación: midiendo en la página la distancia, o más exactamente la *cercanía*, que hay desde el punto en cuestión a las tres bioformas de situación. Así pues, cuanto más cerca nos encontremos del insecto en el plano, más se parecerán a un insecto las bioformas locales. Si nos movemos hacia el árbol a lo largo del cristal, los «insectos» se volverán gradualmente menos parecidos a los insectos y más a los árboles. Si nos situamos en el centro del triángulo, los animales que se encuentran allí, por ejemplo, la araña con un candelabro judío de siete brazos en su cabeza, serán el resultado de los diferentes «compromisos genéticos» entre las tres bioformas de situación.

Pero esta explicación da, en conjunto, demasiada importancia a las tres bioformas de situación. Hay que admitir que el

ordenador las utilizó para calcular las fórmulas genéticas apropiadas de cada punto del dibujo. Pero, en realidad, cualquier conjunto de tres puntos de situación en un plano hubiese servido igual, y con idénticos resultados. Por esta razón, no he dibujado el triángulo en la figura 7. La figura corresponde al mismo tipo de dibujo que la figura 6. Simplemente, muestra un plano diferente. El mismo insecto es uno de los tres puntos de situación; esta vez, el derecho. Los otros puntos de situación son, en este caso, el «spitfire» y la flor-abeja, como se ve en la figura 5. En este plano se observa, también, que las bioformas vecinas se parecen entre sí más que las bioformas distantes. Por ejemplo, el «spitfire» es parte de un escuadrón de aeronaves similares, volando en formación. Como el insecto está a ambos lados del cristal, podría pensarse que las dos láminas se cruzan entre sí, formando un ángulo. En relación con la figura 6, el plano de la figura 7 se dice que está «rotado alrededor» del insecto.

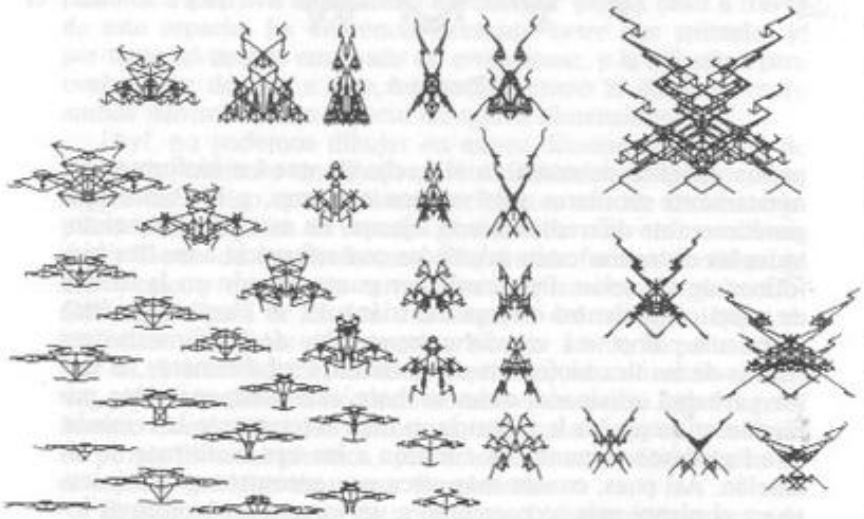


FIGURA 7.

La supresión del triángulo es una mejora de nuestro método, porque constituía una distracción. Daba una importancia indebida a tres puntos particulares del plano. Todavía tenemos pendiente otra mejora. En las figuras 6 y 7, la distancia espacial representa la distancia genética, pero la *escala* está distorsionada.

Una pulgada hacia arriba no es equivalente necesariamente a una pulgada a través. Para remediarlo, debemos escoger cuidadosamente nuestras tres bioformas de situación, de manera que las distancias genéticas que las separan sean las mismas. La figura 8 lo hace. Aquí tampoco está dibujado el triángulo. Los tres puntos de situación son el escorpión de la figura 5, el insecto otra vez (tenemos todavía otra «rotación alrededor» del insecto) y una bioforma bastante indescriptible, situada en la parte superior. Estas tres bioformas están todas a 30 mutaciones de distancia entre sí. Ello significa que es igual de fácil evolucionar desde una de ellas a cualquier otra. En los tres casos, debe transcurrir un mínimo de 30 pasos genéticos. Las pequeñas rayitas situadas a lo largo del margen inferior de la figura 8 representan unidades de distancia medidas en genes. Puede imaginarse como una regla genética graduada. La regla no trabaja sólo en dirección horizontal. Puede inclinarse en cualquier dirección, y medir la distancia genética y, por tanto, el tiempo mínimo de evolución entre dos puntos del plano (es un fastidio que esto no sea completamente cierto en la página, debido a que la impresión del ordenador distorsiona las proporciones, pero el efecto es dema-

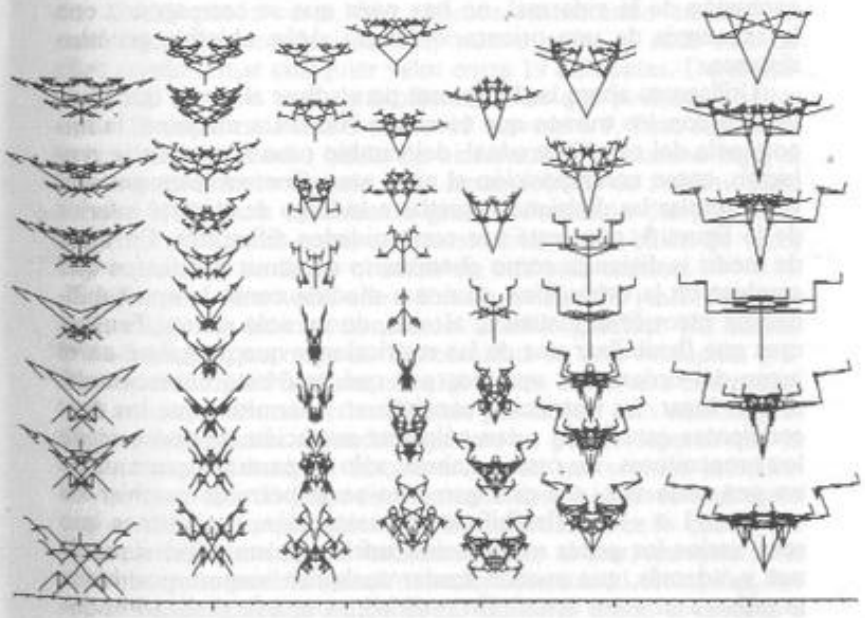


FIGURA 8.

siado trivial para organizar un alboroto, aunque signifique la obtención de una respuesta ligeramente errónea si sólo se cuentan las rayitas de la escala).

Estos planos bidimensionales cortados a través del espacio genético de nueve dimensiones nos dan una sensación de lo que significa caminar a través de la Tierra de las Bioformas. Para mejorar esta sensación, hay que recordar que la evolución no está restringida a un plano bidimensional. En un verdadero paseo a través de la evolución se podría «caer», en cualquier momento, de un plano a otro, por ejemplo desde el plano de la figura 6 al plano de la figura 7 (cerca del insecto, donde los dos planos están próximos entre sí).

He dicho que la «regla genética» de la figura 8 nos permite calcular el tiempo mínimo empleado para evolucionar entre dos puntos. Lo hace así, dadas las restricciones del modelo original, pero el énfasis está en la palabra *mínimo*. Como el insecto y el escorpión están separados por una distancia de 30 unidades genéticas, tendrían que transcurrir 30 generaciones para que evolucionasen desde uno a otro, *sin hacer nunca un giro erróneo*; esto es, conociendo exactamente la fórmula genética hacia la que nos encaminamos, y sabiendo cómo dirigirnos hacia ella. En la evolución de la vida real, no hay nada que se corresponda con la existencia de una orientación hacia algún objetivo genético distante.

Utilicemos ahora las bioformas para volver al punto que planteamos con los monos que escribían Hamlet a máquina, la importancia del cambio gradual, del cambio paso a paso en la evolución, como contraposición al puro azar. Comencemos por volver a rotular las divisiones situadas a lo largo de la parte inferior de la figura 8, pero esta vez con unidades diferentes. En lugar de medir la distancia como el «número de genes que tienen que cambiar en la evolución», vamos a medirla como la «probabilidad de recorrer la distancia, al azar, de un solo salto». Tendremos que flexibilizar una de las restricciones que programé en el juego del ordenador: veremos por qué creé esta limitación en primer lugar. La restricción consistía en «permitir» que los descendientes estuviesen a tan sólo una mutación de distancia de los progenitores. En otras palabras, sólo se permitía que mutase un gen cada vez, y a este gen sólo se le permitía cambiar su «valor» +1 o −1. Al flexibilizar esta restricción, permitimos que sean varios los genes que puedan sufrir una mutación simultánea y, además, que puedan sumar cualquier numero positivo o negativo a su valor actual. En realidad, es una flexibilización demasiado amplia, ya que permite valores genéticos que oscilan entre menos infinito y más infinito. Sin embargo, el objetivo también se cumple adecuadamente, si restringimos los valores de los genes a cifras de un solo número, esto es, si permitimos que varíen entre −9 y +9.

Así pues, dentro de estos amplios límites, estamos permitiendo, en teoría, una mutación en una sola etapa, en una sola generación, que podría cambiar cualquier combinación de los nueve genes. Además, el valor de cada gen puede cambiar cualquier cantidad, en tanto no llegue a las dos cifras. ¿Qué significa esto? Significa que, en teoría, la evolución podría saltar, en una sola generación, desde un punto cualquiera en la Tierra de las Bioformas a otro. No sólo desde cualquier punto en un plano, sino desde cualquier punto en el hipervolumen de nueve dimensiones. Si, por ejemplo, se quisiera saltar de un solo golpe desde el insecto al zorro en la figura 5, he aquí la fórmula. Añádanse los siguientes números a los valores de los genes 1 a 9, respectivamente: −2, 2, 2, −2, 2, 0, −4, −1, 1. Pero ya que estamos hablando de saltos al azar, todos los puntos de la Tierra de las Bioformas tienen la misma probabilidad de ser el destino de uno de estos saltos. Así pues, las probabilidades en contra de saltar a un destino *determinado*, por ejemplo el zorro, por pura suerte, es fácil de calcular. Es el número total de bioformas en el espacio. Como puede verse, nos estamos embarcando en otro de esos cálculos astronómicos. Hay nueve genes, y cada uno de ellos puede tomar cualquier valor entre 19 diferentes. De manera que el número total de bioformas a las que *podríamos* saltar es de 19 veces cada una 9 veces: 19 elevado a 9. Esto representa alrededor de medio billón de bioformas. Un número bajo, si se compara con el «número de la hemoglobina» de Asimov, pero aun así lo llamaría un número grande. Partiendo del insecto, y comenzando a saltar como una mosca loca medio billón de veces hay esperanzas de llegar al zorro en una sola ocasión.

¿Qué nos dice todo ello sobre la evolución real? Una vez más, insiste en la importancia del cambio *gradual*. Ha habido evolucionistas que negaron la necesidad de una evolución gradual de este tipo. Nuestros cálculos de las bioformas nos muestran *exactamente* una de las razones por la que este cambio gradual es importante. Cuando digo que se puede esperar que la evolución salte desde el insecto a uno de sus vecinos inmediatos, pero *no* que lo haga directamente desde el insecto al zorro o al escorpión, lo que quiero decir exactamente es lo que sigue. Si se producen realmente verdaderos saltos al azar, entonces sería perfectamente posible un salto desde el insecto al escorpión. Por supuesto, sería *tan* probable como un salto desde el insecto a uno de sus vecinos inmediatos. Pero tendría también la misma probabilidad que un salto a cualquier otra bioforma existente. Y

aquí está la dificultad. Dado que el número de bioformas existentes es de medio billón, si ninguna de ellas tiene probabilidad mayor como destino que el resto, la probabilidad de saltar a una *en concreto* sería lo suficientemente pequeña como para ignorarla.

Obsérvese que no nos ayuda el hecho de asumir que hay una poderosa «presión selectiva» no aleatoria. No importa que prometamos una enorme fortuna, si se consigue un salto afortunado hasta el escorpión. Las probabilidades en contra de hacerlo son todavía de medio billón a una. Pero si, en lugar de saltar, *caminamos* paso a paso, y recibimos una moneda como premio cada vez que lo hacemos en la dirección correcta, alcanzaríamos al escorpión en un corto período de tiempo. No necesariamente en el tiempo más rápido posible de 30 generaciones, pero muy rápido, a pesar de todo. Saltando podríamos, *en teoría*, conseguir un premio más rápido, de una sola vez. Pero, debido a las probabilidades astronómicas en contra del éxito, el único camino posible consiste en una serie de pequeños pasos, cada uno construido sobre el éxito acumulado de las etapas previas.

El tono de los párrafos anteriores está abierto a una interpretación errónea que debo desmentir. Suena, una vez más, como si la evolución tratase de alcanzar objetivos distantes, que residen en cosas como los escorpiones. Según hemos visto, nunca lo hace. Pero si pensamos en este objetivo como *algo que mejore las posibilidades de supervivencia*, el argumento sería todavía válido. Si un animal es un progenitor, debe ser lo suficientemente bueno como para sobrevivir, por lo menos, hasta la edad adulta. Es posible que uno de sus descendientes mutantes pudiese ser incluso mejor en cuanto a la supervivencia. Pero si sufriese una mutación enorme, de forma que se hubiese movido a una gran distancia de sus progenitores en el espacio genético, ¿cuáles serían las posibilidades de ser mejor que su padre? La respuesta es que las probabilidades en contra serían muy grandes. Y la razón es la que acabamos de ver en nuestro modelo de las bioformas. Si el salto mutacional que estamos considerando fuese muy grande, el número de destinos *posibles* de este salto sería astronómicamente grande. Debido a que, como vimos en el capítulo 1, el número de formas diferentes de estar muerto es mucho mayor que el de formas de estar vivo, la probabilidad de que un gran salto al azar en el espacio genético terminase con la muerte, sería muy elevada. Incluso un pequeño salto al azar en el espacio genético es muy probable que terminase con la muerte. Pero cuanto más pequeño sea este salto, menor será la probabilidad de que se produzca la muerte, y mayor la de que se produzca una mejora como resultado. Volveremos a este tema en un capítulo posterior.

Hasta aquí es hasta donde quiero llegar sacando moralejas de la Tierra de las Bioformas. Espero que no lo hayan encontrado demasiado abstracto. Hay otro espacio matemático lleno, no con bioformas de nueve genes sino con animales de carne y hueso hechos de millones de células, cada una de las cuales contiene miles y miles de genes. Éste no es un espacio de bioformas sino el espacio genético real. Los animales reales que han vivido siempre en la Tierra son un subgrupo diminuto de los animales teóricos que *podrían* existir. Estos animales reales son el producto de un pequeño número de trayectorias evolutivas en el espacio genético. La gran mayoría de las trayectorias evolutivas en el espacio animal dan lugar a monstruos inviables. Los animales reales están distribuidos aquí y allí entre los monstruos hipotéticos, cada uno localizado en un sitio propio y único, dentro del hiperespacio genético. Cada animal real está rodeado de un pequeño grupo de vecinos, la mayoría de los cuales no han existido nunca, pero algunos de los cuales son sus antepasados, sus descendientes y sus parientes.

Localizados en algún lugar de este inmenso espacio matemático están los seres humanos y las hienas, osos hormigueros, gusanos planos y calamares, dodos y dinosaurios. En teoría, si fuésemos lo suficientemente diestros en ingeniería genética, podríamos movernos desde un punto a otro en el espacio animal. Podríamos movernos, partiendo de cualquier punto, a través del laberinto, de manera que podríamos volver a crear el dodo, el tiranosaurio y los trilobites, tan sólo si supiésemos qué genes hay que remedar, y qué trozos del cromosoma habría que duplicar, invertir o suprimir. Dudo que lleguemos a saber algún día lo suficiente como para hacerlo, pero estas preciadas criaturas están allí escondidas para siempre en sus rincones privados de este hipervolumen genético, esperando ser *encontradas*, si tuviéramos los conocimientos para navegar siguiendo el rumbo correcto a través del laberinto. Podríamos incluso ser capaces de hacer *evolucionar* una reconstrucción exacta de un dodo criando pichones selectivamente, aunque tendríamos que vivir un millón de años para completar el experimento. Pero cuando se nos impide hacer un viaje en la realidad, la imaginación no es un mal sustituto. Para quienes, como yo, no son matemáticos, el ordenador puede ser un poderoso amigo de la imaginación. Al igual que las matemáticas, no sólo ensancha la imaginación, también la disciplina y la controla.

4. TRAZAR SENDAS A TRAVÉS DEL ESPACIO ANIMAL

Como vimos en el capítulo 2, mucha gente encuentra difícil de creer que algo tan complejo y bien diseñado como un ojo, el ejemplo favorito de Paley, con tantas piezas funcionales engranadas entre sí, puede haberse originado a partir de unos comienzos insignificantes, mediante una serie de cambios graduales. Analicemos otra vez el problema, a la luz de esta nueva intuición que nos han proporcionado las bioformas. Contestemos estas dos preguntas:

1. ¿Pudo el ojo humano haberse originado directamente a partir de la nada, en una sola etapa?
2. ¿Pudo el ojo humano haberse originado directamente a partir de algo ligeramente diferente, algo que podríamos llamar X?

La respuesta a la pregunta 1 es un *no* rotundo. Las probabilidades en contra de un «sí» como respuesta a ese tipo de preguntas son muchos miles de millones de veces mayores que el número de átomos del universo. Se necesitaría un salto gigantesco y tremendamente improbable a través del hiperespacio genético. La respuesta a la pregunta 2 es un *sí* igualmente claro, siempre que la diferencia entre el ojo moderno y su inmediato predecesor X sea lo suficientemente pequeña. En otras palabras, siempre que estén suficientemente cerca entre sí en el espacio que abarca todas las estructuras posibles. Si la respuesta a la pregunta 2 es un no, para una diferencia determinada, todo lo que tenemos que hacer es repetir la pregunta, utilizando una diferencia menor. Debemos continuar haciéndolo hasta que encontremos una diferencia lo suficientemente pequeña como para darnos un «sí» como respuesta.

X se *define* como algo muy similar a un ojo humano, lo suficientemente similar al ojo humano como para que éste se hubiera podido originar en apariencia por una sola alteración de X. Si se tiene una imagen mental de X, y se encuentra poco creíble que el ojo humano pudiera haberse originado directamente de él, significa que se ha escogido un X erróneo. Hay que hacer que la imagen mental de X sea progresivamente más similar a la de un ojo humano, hasta encontrar un X que *parezca* un precursor inmediato posible del mismo. Tiene que haber uno para cada persona, aunque su idea de lo que es posible pueda ser más o menos prudente que la mía.

Ahora, después de haber encontrado un X tal que la respuesta a la pregunta 2 sea sí, apliquemos la misma cuestión al propio X. Por el mismo razonamiento, debemos llegar a la conclusión de que X pudo haberse originado en apariencia, directamente mediante un solo cambio, a partir de algo apenas diferente, que podemos llamar X′. Obviamente, podemos seguir entonces la pista a X′ hasta encontrar algo ligeramente diferente, X″, y así sucesivamente. Interponiendo una serie lo suficientemente grande de X, podemos hacer que el ojo humano se derive de algo no sólo un poco, sino muy distinto de él mismo. Podremos «caminar» una gran distancia a través del «espacio animal», y nuestros movimientos serán creíbles siempre que demos pasos lo suficientemente pequeños. Estamos ahora en posición de contestar una tercera pregunta.

3. ¿Existe una serie continua de X que conecten el ojo humano actual con un estadio en el que todavía no existía el ojo?

Me parece claro que la respuesta tiene que ser sí, siempre que nos permitamos una serie *suficientemente grande* de X. Podría pensarse que 1000 X es una serie grande, pero si se necesitan más etapas para hacer una transición completa que sea creíble, simplemente habría que asumir la existencia de 10 000 X. Y si 10 000 no son suficientes, habría que pensar en 100 000, y así sucesivamente. El tiempo disponible impone, sin embargo, un límite a este juego, ya que sólo puede haber un X por generación. En la práctica, la cuestión se resuelve por sí misma: ¿ha pasado suficiente tiempo como para que hayan existido suficientes generaciones sucesivas? No podemos dar una respuesta precisa al número de generaciones que serían necesarias. Lo que sí sabemos es que el tiempo geológico es tremendamente largo. Para dar una idea del orden de magnitud de lo que estamos hablando, el número de generaciones que nos separan de nuestros primeros ancestros habría que medirlo en miles de millo-

nes. Si tenemos, por ejemplo, cien millones de X, deberíamos ser capaces de construir una serie creíble de gradaciones diminutas que estableciesen una unión entre el ojo humano y cualquier otra cosa.

Hasta ahora, mediante un proceso de razonamiento más o menos abstracto hemos llegado a la conclusión de que existe una serie de X imaginables, lo suficientemente similares como para poder transformarse, aparentemente, entre sí, y que esta serie completa uniría el ojo humano, retrospectivamente, con un punto en el que aún no existía. Pero todavía no hemos demostrado que esto sea plausible, que esta serie de X existieran en realidad. Tenemos dos preguntas más que contestar.

4. Considerando aisladamente los miembros de la serie de hipotéticos X que conectan el ojo con un punto en el que éste no existía, ¿es posible que cada uno de ellos se originase por una mutación al azar de su predecesor?

Ésta es, realmente, una pregunta de embriología, no de genética, y es una cuestión enteramente diferente de la que preocupaba al obispo de Birmingham, entre otros. Las mutaciones funcionan modificando el proceso de desarrollo embrionario existente. Es discutible que cierto tipo de procesos embrionarios estén muy sujetos a variaciones en una dirección, y se resistan a sufrirlas en otras. Volveré sobre este tema en el capítulo 11, aunque aquí subrayaré una vez más la diferencia entre un cambio pequeño y uno grande. Cuanto más pequeño sea el cambio postulado, y más pequeña sea la diferencia entre X″ y X′, más posible será, desde un punto de vista embriológico, la mutación que nos preocupa. En el capítulo anterior vimos, sobre una base puramente estadística, que una mutación grande *cualquiera* es inherentemente menos probable que una pequeña. Por consiguiente, sea cual fuere el problema que pueda originar la pregunta 4, vemos que cuanto más pequeña hagamos la diferencia entre un X′ y un X″ determinados, más pequeño será éste. Mi idea es que, siempre que la diferencia entre los intermediarios vecinos de nuestra serie que conduce al ojo sea *suficientemente pequeña*, las mutaciones precisas están casi obligadas a aparecer. Después de todo, estamos hablando siempre de pequeños cambios cuantitativos en un proceso embriológico existente. Hay que recordar que, no importa lo complejo que pueda ser el *status quo* embriológico de una generación determinada, cada *cambio* mutacional en ese *status quo* puede ser muy pequeño y simple.

Tenemos una pregunta final que responder:

5. Considerando aisladamente los miembros de la serie X que conectan el ojo humano con el comienzo de su existencia, ¿es posible que cada uno funcionase lo suficientemente bien como para haber contribuido a la supervivencia y reproducción de los animales implicados?

Curiosamente, algunas personas han pensado que la respuesta a esta pregunta es un «no» evidente. Por ejemplo, cito un párrafo del libro de Francis Hitching, escrito en 1982, titulado: *The Neck of the Giraffe or Where Darwin Went Wrong* (El cuello de la jirafa o dónde se equivocó Darwin). Podría haber acotado básicamente estas mismas palabras en cualquier folleto de los Testigos de Jehová, pero escogí este libro porque un editor reputable (Pan Books Ltd.) lo encontró apropiado para su publicación, a pesar de contener un gran número de errores que hubiesen sido detectados rápidamente, si se le hubiese pedido a un licenciado en biología en paro, o incluso a un estudiante, que echase un vistazo al manuscrito. (Mis errores favoritos, si se me permiten dos bromas, son la concesión del título de caballero al profesor John Maynard Smith, y la descripción del profesor Ernst Mayr, este elocuente y gran antimatemático archicrítico de la genética matemática, como el «sumo sacerdote» de la genética matemática.)

> Para que el ojo funcione, tienen que producirse los siguientes pasos mínimos, perfectamente coordinados (hay otros muchos que se producen simultáneamente, pero incluso una descripción muy simplificada resulta suficiente para señalar los problemas de la teoría de Darwin). El ojo debe estar limpio y húmedo, mantenido en este estado por la interacción de la glándula lacrimal y el movimiento de los párpados, cuyas pestañas actúan también como un filtro rudimentario frente al sol. La luz pasa luego a través de una pequeña sección transparente de la capa protectora externa (la *córnea*), y continúa a través del *cristalino*, que la enfoca hacia la *retina* en la parte posterior. Aquí se producen reacciones fotoquímicas en 130 millones de conos y bastones, que transforman la luz en impulsos eléctricos. Alrededor de 1 000 millones de estos impulsos son transmitidos cada segundo, por mecanismos que no se comprenden en su totalidad, hasta el cerebro, que realiza las acciones apropiadas.
>
> Ahora bien, es bastante evidente que si la más ligera cosa no funciona en *este trayecto* –si la córnea está borrosa, o la pupila no se dilata, o el cristalino se torna opaco, o el enfoque no funciona– entonces no se formaría una imagen reconocible. El ojo funciona como un todo, o no funciona. De manera que ¿cómo pudo llegar a evolucionar mediante lentas, continuas e infinitamente pequeñas mejoras darwinianas? ¿Es realmente posible que

se produzcan miles de mutaciones al azar de manera coincidente, de forma que el cristalino y la retina, que no pueden funcionar el uno sin el otro, evolucionaran sincronizados? ¿Qué valor puede tener para la supervivencia un ojo que no puede ver?

Este notorio argumento se propone con mucha frecuencia, presumiblemente porque la gente *quiere* creer en su conclusión. Considerar la afirmación de que «si la más ligera cosa no funciona... si el enfoque no funciona... no se forma una imagen reconocible». La probabilidad de que alguien esté leyendo estas palabras a través de unas gafas no puede estar más allá del 50/50. Quíteselas y mire a su alrededor. ¿Estaría usted de acuerdo con que no se forma una imagen que pueda reconocerse? Si es usted varón, las probabilidades son de 1 en 12 de que sea daltónico. Puede que también tenga astigmatismo. No es improbable que, sin gafas, su visión sea una mancha borrosa. Uno de los teóricos actuales más distinguidos en el campo de la evolución (aunque todavía no haya sido armado caballero) limpia sus gafas en tan raras ocasiones que probablemente sólo pueda ver manchas borrosas, aunque parece llevarlo bastante bien y, según cuenta, solía jugar un juego parecido al squash con monóculo. Si pierde sus gafas, puede ser que sus amigos se inquieten cuando no les reconozca en la calle. Pero usted mismo se inquietaría más si alguien le dijese: «Como su vista no es ahora absolutamente perfecta, tiene que moverse con los ojos completamente cerrados hasta que encuentre de nuevo sus gafas.» Esto es, sin embargo, lo que sugiere el autor del pasaje que he acotado.

También afirma que el cristalino y la retina no pueden trabajar el uno sin el otro. ¡Con qué autoridad! Alguien cercano a mí ha sufrido una operación de cataratas en ambos ojos. Como resultado, no tiene ninguno de los dos cristalinos. Sin gafas, no podría ni siquiera iniciar una jugada de tenis o apuntar con un rifle. Pero me asegura que se está mucho mejor con los ojos sin cristalino que sin ojos. Todavía puede decir cuándo va a chocar contra una pared o contra otra persona. Si fuese una criatura salvaje, podría utilizar los ojos sin cristalino para detectar la presencia de la silueta de un depredador, y la dirección desde la que se aproxima. En un mundo primitivo, donde unas criaturas no tuviesen ojos, y otras tuviesen ojos sin cristalino, estas últimas tendrían toda suerte de ventajas. Y hay una serie continua de X, de forma que cada diminuta mejora en la agudeza de la imagen, desde la mancha que se desliza hasta la visión perfecta, aumenta en apariencia las posibilidades de supervivencia del organismo.

El libro continúa citando a Stephen Jay Gould, el notorio paleontólogo de Harvard, diciendo:

Eludimos una excelente pregunta: ¿qué ventaja tiene un cinco por ciento de un ojo?, arguyendo que el poseedor de una estructura tan incipiente no la utilizaría para ver.

Un animal primitivo con un cinco por ciento de un ojo podría haberlo utilizado para alguna otra cosa distinta que para ver, pero a mí me parece que existe la misma probabilidad de que lo utilizase para gozar de un cinco por ciento de visión. Y, en realidad, no pienso que sea ésta una excelente pregunta. Una visión que es un cinco por ciento tan buena como la de otra persona o la mía tiene mucho valor, comparada con la falta total de visión. Igual que es mejor una visión de un uno por ciento que la ceguera total. Y el seis por ciento es mejor que el cinco, el siete por ciento mejor que el seis, y así sucesivamente, a lo largo de una serie gradual y continua.

Esta clase de problemas preocupa a algunas personas interesadas en los animales que se protegen contra los depredadores mediante «mimetismo». Los insectos con forma de ramita parecen ramitas y evitan así que los devoren los pájaros. Los insectos con forma de hoja parecen hojas. Muchas especies comestibles de mariposas mejoran su protección asemejándose a otras especies nocivas o venenosas. Estos parecidos son mucho más impresionantes que el de las nubes con las comadrejas. En muchos casos, son más impresionantes que el parecido de «mis» insectos con los insectos reales. Los insectos reales, después de todo, ¡tienen seis patas, no ocho! La selección natural real ha tenido, sin embargo, un millón de veces más generaciones de las que yo he tenido, para perfeccionar el parecido.

Utilizamos la palabra «mimetismo» en estos casos, no porque pensemos que los animales imitan conscientemente otras cosas, sino porque la selección natural ha favorecido a aquellos individuos cuyos cuerpos se confunden con otras cosas. Para decirlo de otra manera, los antepasados de los insectos con forma de ramita que no parecían ramitas, no dejaron descendientes. El genetista germano americano Richard Goldschmidt es el más destacado entre los que han discutido que la evolución *primitiva* de estos parecidos no puede haber sido favorecida por la selección natural. Como dice Gould, un admirador de Goldschmidt, sobre los insectos que se asemejan al estiércol: «¿Puede haber alguna ventaja en parecerse un cinco por ciento a un trozo de estiércol?» En gran parte bajo la influencia de Gould, se ha puesto recientemente de moda decir que Goldschmidt fue infravalorado en su tiempo, y que tiene mucho que enseñarnos. He aquí un ejemplo de su razonamiento:

> Ford habla... de cualquier mutación que consiga suministrar un «parecido remoto» con otra especie más favorecida, de la que pudiera resultar alguna ventaja, por ligera que fuera. Debemos preguntarnos hasta dónde debe llegar el parecido para que tenga un valor selectivo. Podemos asumir que los pájaros, los monos y las mantis son unos observadores tan maravillosos (o que algunos muy listos entre ellos lo son) como para observar una semejanza «remota» y ser repelidos por ella. Yo pienso que es pedir demasiado.

Este sarcasmo enfermizo se convierte en algo distinto en el firme inseguro que pisa aquí Goldschmidt. ¿Observadores *maravillosos*? ¿Algunos muy *listos* entre ellos? ¡Cualquiera pensaría que los pájaros y los monos se *benefician* de ser engañados por un parecido remoto! Goldschmidt podría haber dicho: «¿Podemos realmente asumir que los pájaros, etc., son tan *poco* observadores (o que algunos muy estúpidos entre ellos lo son)?» Sin embargo, aquí se encierra un verdadero dilema. La semejanza inicial del antepasado del insecto-ramita con una ramita debe de haber sido muy remota. Un pájaro tendría que tener una visión extremadamente *mala* para ser engañado por él. Aun así, la semejanza de un insecto-ramita moderno con una ramita es francamente buena, hasta detalles tan finos como un brote falso o un nervio de una hoja. Los pájaros cuya actividad depredadora selectiva puso los toques finales a su evolución, deben de haber tenido, por lo menos colectivamente, una visión *excelente*. Debe de haber sido extremadamente difícil engañarlos; de otra manera, los insectos no habrían evolucionado hasta llegar a ser las perfectas imitaciones que son: hubiesen permanecido como imitaciones relativamente imperfectas. ¿Cómo podríamos resolver esta aparente contradicción?

Un tipo de respuesta sugiere que la visión del pájaro habría ido mejorando, durante el mismo intervalo de tiempo evolucionario, de igual manera que el camuflaje del insecto. Quizá, siendo un poco bromista, un antepasado de los insectos que se pareciese sólo un cinco por ciento a un excremento habría engañado a un pájaro con sólo un cinco por ciento de visión. Pero no es esta la clase de respuesta que quiero dar. Sospecho que todo el proceso evolutivo, desde el parecido remoto al mimetismo casi perfecto, transcurrió con bastante rapidez, a veces más en diferentes grupos de insectos, durante un largo período en el que la visión de los pájaros habría sido tan buena como lo es hoy día.

Otro tipo de respuesta ofrecido para resolver este dilema es la siguiente. Quizá cada especie de pájaro o mono tuviese mala

visión y se concentrara sólo en un aspecto limitado de un insecto. Puede ser que una especie de depredador observase sólo el color, otra sólo la forma, otra sólo la textura, y así sucesivamente. Por consiguiente, un insecto que se asemejase a una ramita engañaría sólo a un tipo de depredador con un punto de vista limitado, aun cuando pudiese ser devorado por otras clases de depredadores. Al ir progresando la evolución, se irían añadiendo más y más rasgos al repertorio de semejanzas de los insectos. La perfección final multifacética de cualquier mimetismo se lograría gracias a la suma de las selecciones naturales facilitadas por las distintas especies de depredadores. Ningún depredador vería toda la perfección de un mimetismo, sólo la vemos nosotros.

Esto parece implicar que sólo nosotros somos lo suficientemente «listos» para ver el mimetismo en toda su gloria. No es sólo a causa de esta aparente superioridad humana por lo que prefiero otra explicación. Esta explicación consiste en que no importa lo buena que sea la visión de un depredador en unas circunstancias determinadas, puede ser sumamente pobre en otras. De hecho, podemos apreciar fácilmente con nuestra experiencia habitual todo el espectro desde una visión extremadamente pobre hasta una visión excelente. Si miro un insecto con forma de ramita, situado a 12 cm delante de mi nariz en un día luminoso, no me engañaría. Podría observar las largas patas moviéndose cerca de la línea del tronco. Podría descubrir una simetría artificial que no tiene una ramita real. Pero si, con los mismos ojos y el mismo cerebro, estoy paseando por un bosque al anochecer, probablemente no lograría distinguir ningún insecto de color oscuro de las ramitas que abundan por todas partes. O puede que la imagen del insecto se reflejase en el borde de mi retina, en lugar de hacerlo en la zona central, más aguda. O también que el insecto estuviese a unos 50 metros de distancia y, por lo tanto, representase una diminuta imagen en mi retina. O que hubiese tan poca luz que difícilmente pudiera ver algo.

De hecho, no importa lo remoto o escaso que sea el parecido de un insecto con una rama, tiene que haber poca iluminación, o estar a cierta distancia del ojo, o existir cierto grado de distracción en la atención del depredador, para que una buena visión resulte confundida por una semejanza remota. Si esto no se encuentra creíble en el ejemplo que se ha imaginado, basta atenuar un poco la luz imaginada, o alejarse un poco del objeto imaginado. Lo esencial es que muchas veces un insecto se salva teniendo un parecido extremadamente ligero con una ramita, una hoja o un trozo de estiércol caído, en ocasiones porque estaba lejos del depredador, o porque el depredador le estaba mirando

en la oscuridad, o a través de la niebla, o mientras estaba distraído con una hembra receptiva. Y otras muchas veces se salva, quizá del mismo depredador, debido a su misterioso parecido con una ramita, cuando el depredador lo estaba mirando desde cerca y con buena luz. Lo importante sobre la intensidad de la luz, la distancia entre el insecto y el depredador, la distancia entre la imagen y el centro de la retina, y otras variables similares, es que todas son variables *continuas*. Varían insensiblemente a lo largo de todo un intervalo que va desde el extremo de la invisibilidad al extremo de la visibilidad. Estas variables continuas fomentan una evolución gradual y continua.

El problema de Richard Goldschmidt –parte de una concepción que le hizo recurrir, durante la mayor parte de su vida profesional, a la creencia extrema de que la evolución da grandes saltos en lugar de pequeños pasos– resulta que no es un problema, después de todo. Incidentalmente, también hemos demostrado una vez más, que un cinco por ciento de visión es mejor que nada. La calidad de mi visión justo en el borde de mi retina es probable que tenga incluso menos del cinco por ciento de la calidad del centro de mi retina, cualquiera que sea la forma en que se mida esta calidad. Y aun así puedo detectar la presencia de un gran camión o un autobús con el rabillo del ojo. Puesto que conduzco una bicicleta para ir a trabajar todos los días, es bastante probable que este hecho haya salvado mi vida más de una vez. Observo la diferencia en aquellas ocasiones en las que llueve o en las que llevo puesto un sombrero. La calidad de nuestra visión en una noche oscura debe ser mucho menor que el cinco por ciento de lo que lo es a mediodía. Y, sin embargo, muchos de nuestros antepasados se salvaron gracias a que vieron algo realmente importante, quizá un tigre de dientes de sable, o un precipicio, en medio de la noche.

Todos sabemos, por experiencia personal, que, en las noches oscuras, hay una serie insensiblemente continua de gradaciones que van desde una ceguera total hasta una visión perfecta, y que cada escalón a lo largo de esta serie otorga unos beneficios significativos. Una visión del mundo a través de unos binoculares enfocados y desenfocados de manera progresiva, puede convencernos rápidamente de que hay una serie gradual de calidades en el enfoque, siendo cada paso de esta serie una mejora sobre el anterior. Al girar progresivamente el mando de color de una televisión, podemos convencernos de que hay una serie gradual de mejoras progresivas desde el blanco y negro hasta la visión total en color. El diafragma del iris que abre y cierra la pupila evita que quedemos deslumbrados por una luz brillante, al mismo tiempo que nos permite ver con una luz oscura. Todos hemos

experimentado lo que es no tener diafragma en el iris, cuando quedamos deslumbrados momentáneamente por las luces delanteras de un coche que se aproxima. Aunque este deslumbramiento pueda ser desagradable, e incluso peligroso, ¡no significa que el ojo haya dejado de trabajar! La afirmación de que «el ojo funciona como un todo o no funciona» resulta que es no sólo falsa sino patentemente falsa para cualquiera que piense durante dos segundos en su experiencia personal.

Volvamos a la pregunta 5. Considerando todos los miembros de la serie de X que conectan el ojo humano con la nada, ¿es posible que cada uno de ellos funcionase lo suficientemente bien como para contribuir a la supervivencia y reproducción de los animales implicados? Hemos visto la estupidez de la suposición antievolucionista de que la respuesta es un no obvio. Pero ¿es un sí? Resulta menos obvio, pero pienso que lo es. No sólo está claro que una parte del ojo es mejor que nada. También es posible encontrar una serie de estadios intermedios potenciales entre los animales modernos. Esto no significa, por supuesto, que estos estadios intermedios modernos representen estadios ancestrales. Pero sirve para demostrar que los diseños intermedios pueden funcionar.

Algunos animales unicelulares tienen un punto sensible a la luz con una pequeña pantalla pigmentada en su parte posterior. La pantalla les protege de la luz que viene en un sentido, lo que les da una «idea» de dónde procede. Entre los animales multicelulares, varias clases de gusanos y algunos moluscos tienen una estructura similar, aunque las células fotosensibles tapizadas con un pigmento estén aquí localizadas en una pequeña depresión. Esto les da una capacidad mayor de direccionamiento, ya que cada célula está protegida selectivamente de los rayos de luz que penetran en la depresión por su lado. En esta serie continua que va desde la zona plana de células fotosensibles, pasando por la depresión poco profunda, hasta la evaginación profunda, cada escalón en la serie, sea pequeño o grande, debe constituir una mejora. Ahora, si tenemos una evaginación muy profunda y cerramos los bordes, tendremos una cámara oscura. Existe una serie gradual continua que va desde la depresión poco profunda hasta la cámara oscura (véanse como ilustración, las primeras siete generaciones de la serie evolutiva de la figura 4).

Una cámara oscura forma una imagen definida, más nítida (pero más oscura) cuanto más pequeño es el agujero, y más brillante (pero más borrosa) cuanto más grande. El molusco nadador *Nautilus*, una criatura bastante extraña parecida al calamar, que vive en una concha como los extintos ammonites (véase el «cefalópodo con concha» de la figura 5), tiene un par de cáma-

ras oscuras como ojos. El ojo tiene básicamente la misma forma que el nuestro, pero no tiene cristalino y la pupila es un agujero que deja entrar el agua del mar en el interior del ojo hueco. Realmente, el *Nautilus* es un rompecabezas. ¿Por qué, durante los cientos de millones de años desde que evolucionó la cámara oscura en sus antepasados, no descubrió nunca el principio del cristalino? La ventaja del cristalino es que permite que la imagen sea brillante y nítida a la vez. Lo preocupante sobre el *Nautilus* es que la calidad de su retina sugiere que se beneficiaría realmente en gran medida, y de manera inmediata, si tuviese un cristalino. Es como un sistema de alta fidelidad con un amplificador excelente, alimentado por un gramófono con la aguja despuntada. El sistema está pidiendo a gritos un cambio determinado muy simple. En el hiperespacio genético, el *Nautilus* parece estar sentado muy cerca de una mejora obvia e inmediata, pero no acomete este pequeño paso necesario. ¿Por qué no? Michael Land, de la Universidad de Sussex, nuestra primera autoridad en ojos de invertebrados, está muy interesado en este tema, y yo también. ¿Es que no pueden originarse las mutaciones necesarias, dada la forma en que se desarrollan los embriones de *Nautilus*? No quiero creerlo, pero no encuentro una explicación mejor. Por lo menos, el *Nautilus* dramatiza el punto de que un ojo sin cristalino es mejor que nada.

Cuando se tiene una vesícula por ojo, cualquier material ligeramente convexo, transparente o incluso traslúcido colocado sobre su apertura constituiría una mejora, a causa de sus propiedades similares a las de las lentes. Recoge la luz que incide sobre su área y la concentra sobre un área más pequeña en la retina. Una vez presente este tipo de protolente rudimentaria, se produce una serie continua de mejoras graduales, que la engrosan y la hacen más transparente y menos distorsionante, culminando en lo que todos reconoceríamos como un verdadero cristalino. Los parientes del *Nautilus*, los calamares y los pulpos, tienen cristalinos verdaderos, muy similares a los nuestros, aunque en sus antepasados tuvo lugar una evolución del principio de la cámara oscura completamente independiente de la nuestra. Michael Land considera que hay nueve principios básicos utilizados por los ojos en la formación de imágenes, y que muchos de ellos han evolucionado la mayoría de las veces de forma independiente. Por ejemplo, el principio del espejo curvo, que es radicalmente diferente de nuestra cámara ocular (lo utilizamos en los radiotelescopios, y también en nuestros telescopios más grandes porque es más fácil hacer un espejo grande que una lente grande), ha sido «inventado» independientemente por varios moluscos y crustáceos. Otros crustáceos tienen ojos

compuestos, como los insectos (en realidad, un acúmulo de ojos diminutos), mientras otros, a su vez, como hemos visto, tienen una cámara ocular con lentes como la nuestra, o simplemente una cámara oscura. Para cada uno de estos modelos de ojo existen estadios que se corresponden con los estadios intermedios evolutivos que funcionan como ojos en otros animales modernos.

La propaganda antievolucionista está llena de supuestos ejemplos de sistemas complejos que «probablemente no podrían» haber pasado a través de una serie gradual de estadios intermedios. Esto sólo constituye, con frecuencia, otro caso más del patético «argumento de la incredulidad personal» que encontramos en el capítulo 2. Inmediatamente después de la sección sobre el ojo, *The Neck of the Giraffe* continúa la exposición con el ejemplo del escarabajo bombardero, el cual

> lanza a la cara de sus enemigos un chorro de una mezcla letal de hidroquinona y peróxido de hidrógeno. Estas dos sustancias químicas, cuando se mezclan, explotan. Así que para almacenarlas dentro del cuerpo, el escarabajo bombardero consiguió producir, durante su evolución, inhibidores químicos que los tornan inocuos. En el momento en que el escarabajo lanza el chorro de líquido fuera de su cola, se añade un antiinhibidor, que hace que la mezcla sea de nuevo explosiva. La cadena de sucesos que han conducido a la evolución de esta clase de complejidad, la coordinación sutil de este proceso, está más allá de una explicación biológica sobre la base de cambios hechos paso a paso. La más ligera alteración en el balance químico daría como resultado inmediato una estirpe de escarabajos explosivos.

Un colega bioquímico me ha facilitado amablemente una botella de peróxido de hidrógeno, y la suficiente hidroquinona como para 50 escarabajos bombarderos. Estoy a punto de mezclar las dos sustancias. De acuerdo con lo expresado anteriormente, explotarán en mi cara. Allá vamos...

Bien, aquí estoy, todavía. Mezclé el peróxido de hidrógeno con la hidroquinona, y no sucedió absolutamente nada. Ni siquiera se calentó la mezcla. Por supuesto sabía que pasaría esto: ¡no soy tan temerario! La afirmación de que «estas dos sustancias químicas explotan cuando se mezclan» es, simplemente, falsa, aunque se repita de forma regular en la literatura creacionista. Si existe alguna curiosidad sobre esta faceta del escarabajo bombardero, dicho sea de paso, lo que sucede es lo que sigue. Es cierto que lanza sobre sus enemigos un chorro de una mezcla muy caliente de peróxido de hidrógeno e hidroquinona. Pero ambos no reaccionarán violentamente, a menos que se *añada* un catalizador. Esto es lo que hace el escarabajo bombardero.

En lo que se refiere a los precursores evolutivos del sistema, tanto el peróxido de hidrógeno como varias clases de hidroquinonas se utilizan con otros fines bioquímicos en el organismo. Los antepasados del escarabajo bombardero simplemente ejercieron presión sobre diferentes sustancias químicas que ya estaban presentes. Así es como trabaja la evolución, con frecuencia.

En la misma página del libro donde se describe el pasaje del escarabajo bombardero, figura la pregunta: «¿Qué utilidad tendría medio pulmón? La selección natural eliminaría, con seguridad, a las criaturas con tales rarezas, en lugar de preservarlas.» En un ser humano adulto sano, cada pulmón está dividido en unos 300 millones de cámaras diminutas, situadas en los extremos de un sistema de tubos ramificados. La arquitectura de estos tubos se asemeja al árbol de bioformas de la parte inferior de la figura 2, en el capítulo anterior. En este árbol, el número de ramificaciones sucesivas, determinado por el «gen 9», es de ocho, y el número de puntas de ramitas es de 2 elevado a 8, o sea, 256. Según se va recorriendo la página hacia abajo, el número de puntas de ramitas se duplica sucesivamente. Con el fin de obtener 300 millones de puntas de ramitas, sólo serían necesarias 29 duplicaciones sucesivas. Obsérvese que hay una gradación continua desde la cámara única hasta los 300 millones de cámaras diminutas, y que cada escalón en la gradación viene definido por otra bifurcación ramificada. Esta transición puede realizarse con 29 ramificaciones, que podemos imaginar ingenuamente como un paseo sublime de 29 pasos a través del espacio genético.

El resultado de todas estas ramificaciones es que el área de la superficie interna de cada pulmón es mayor que 60 metros cuadrados. El área es una variable importante para el pulmón, ya que determina el ritmo al que puede entrar el oxígeno y salir el dióxido de carbono de desecho. Ahora bien, lo importante sobre el área es que es una variable *continua*. El área no es algo que se tiene o no se tiene. Es algo de lo que uno puede tener un poco más o un poco menos. Se presta, más que otras muchas cosas, a un cambio *gradual*, a lo largo de todo un rango que va desde 0 hasta 60 metros cuadrados.

Hoy día, muchos pacientes intervenidos quirúrgicamente viven con un solo pulmón, y algunos han sufrido una reducción de hasta un tercio del área normal de un pulmón. Pueden pasear, aunque no muy lejos, o muy rápido. Éste es el punto. El hecho de la reducción gradual del área pulmonar no tiene un efecto absoluto de todo o nada sobre la supervivencia. Es un efecto gradual, que muestra una variación continua sobre la distancia que se puede recorrer paseando, o la rapidez. Un efecto gradual que muestra una variación continua, por supuesto, sobre la expectativa de vida. ¡La muerte no llega súbitamente por debajo de un umbral determinado de área pulmonar! Se va haciendo gradualmente más probable cuando el área pulmonar se reduce por debajo de un nivel óptimo (y también cuando aumenta por encima del nivel óptimo, por diversas razones en conexión con un mal aprovechamiento económico).

El primero de nuestros antepasados que desarrolló pulmones vivía casi con certeza en el agua. Podemos hacernos una idea de cómo sería su respiración observando los peces actuales. La mayoría de estos peces respiran dentro del agua a través de branquias, pero muchas especies que viven en aguas sucias, cenagosas, complementan esta respiración aspirando aire en la superficie. Utilizan la cavidad interna de la boca como una especie de pulmón primitivo (protopulmón) muy rudimentario, y esta cavidad se agranda a veces, formando una bolsa respiratoria, rica en vasos sanguíneos. Como hemos visto, no hay problema en imaginarse una serie de X continuos que conecten un saco único con un conjunto ramificado de 300 millones de sacos, como sucede en el pulmón humano en la actualidad.

Muchos peces actuales han mantenido el saco único, y lo utilizan con un propósito completamente diferente. Aunque probablemente comenzó siendo un pulmón, a lo largo del curso de la evolución se ha transformado en la vejiga natatoria, un ingenioso mecanismo gracias al cual los peces se mantienen como un hidrostato en equilibrio permanente. Un animal sin una vejiga de aire en su interior es normalmente más pesado que el agua, de forma que se hunde hacia el fondo. Ésta es la razón de por qué los tiburones tienen que nadar continuamente para evitar hundirse. Un animal con grandes bolsas de aire en su interior, como nosotros con nuestros grandes pulmones, tendería a elevarse hacia la superficie. En algún punto medio de este espectro continuo, un animal con una vejiga de aire de tamaño correcto no se hundiría ni se elevaría, sino que flotaría en equilibrio, sin tener que realizar ningún esfuerzo. Éste es el truco que han perfeccionado los peces actuales, excepción hecha de los tiburones. A diferencia de los tiburones, los peces no gastan energía para evitar hundirse. Sus aletas y su cola quedan así libres para guiarse e impulsarse con rapidez. No tienen que depender más del aire exterior para llenar la vejiga, sino que tienen unas glándulas especiales que producen el gas. Utilizando estas glándulas y otros mecanismos, regulan con precisión el volumen de gas en la vejiga, y de esta manera mantienen un equilibrio hidrostático adecuado.

Varias especies de peces modernos pueden abandonar el

agua. En un extremo está la perca trepadora india, que raramente entra en el agua. En ella ha evolucionado independientemente un tipo de pulmón bastante diferente del pulmón de nuestros antepasados, una cámara de aire que rodea las branquias. Otros peces viven en el agua, pero hacen breves incursiones fuera de ella. Esto sería, tal vez, lo que hicieron nuestros antepasados. Lo importante sobre las incursiones es que su duración puede variar de manera continua, hasta llegar a cero. Si hay un pez que básicamente vive y respira en el agua, pero que en ocasiones se aventura en tierra, quizá para cruzar desde un charco de lodo a otro y sobrevivir así a una sequía, podría beneficiarse no sólo de medio pulmón sino de una centésima de pulmón. No importa lo pequeño que sea un pulmón primitivo, debe de haber un período de tiempo durante el cual se podría resistir fuera del agua, un poco más que sin ese pulmón. El tiempo es una variable continua. No hay ninguna división rígida entre los animales que respiran en el agua y los que respiran en el aire. Distintos animales pueden emplear el 99 % de su tiempo en el agua, el 98 %, el 97 %, y así sucesivamente, hasta el 0 %. En cada etapa del camino, cualquier aumento fraccionario del área pulmonar constituirá una ventaja. Existe una continuidad, y una gradación, a todo lo largo del camino.

¿Qué utilidad tiene media ala? ¿Cómo aparecieron las alas? Muchos animales saltan de rama en rama, y a veces caen al suelo. La superficie corporal, especialmente en los animales pequeños, retiene el aire ayudando a dar el salto, o amortiguando la caída, actuando como un paracaídas muy rudimentario. Cualquier tendencia a incrementar la relación entre la superficie y el peso ayudaría a esta función; por ejemplo, unos colgajos de piel que creciesen en los ángulos de las articulaciones. A partir de aquí, habría una serie de gradaciones hasta desembocar en alas planeadoras, y de aquí a las alas móviles. Obviamente, hay distancias que no podrían haber saltado los primeros animales equipados con alas rudimentarias (protoalas). Es igualmente obvio que a cada pequeño aumento en el tamaño o mejora en el diseño de las superficies primitivas utilizadas para retener el aire, le debería corresponder una distancia, aunque sea corta, que podría saltarse con este colgajo pero no sin él.

Si el prototipo de colgajo de alas funcionase para amortiguar la caída del animal, no podríamos decir «Por debajo de cierto tamaño, los colgajos no tienen utilidad». Una vez más, no importa el tamaño ni la falta de parecido que tuviesen los primeros colgajos con las alas. Debe de haber habido alguna altura, llamémosla *h*, tal que un animal se rompería el cuello si cayese desde ella, pero sobreviviría si cayese desde una altura ligeramente más baja. Dentro de esta zona crítica, cualquier mejora en la capacidad del cuerpo para retener el aire y amortiguar la caída, no importa lo ligera que ésta fuese, podría representar la diferencia entre la vida y la muerte. La selección natural favorecería así los prototipos de colgajos alares. Cuando éstos se hubiesen convertido en la norma, la altura crítica *h* se haría ligeramente mayor. En este momento, un ligero aumento de los colgajos alares establecería la diferencia entre la vida y la muerte. Y así sucesivamente, hasta que tuviésemos unas alas características.

Hoy día, hay animales vivos que ilustran bellamente cada estadio del espectro continuo. Hay ranas que planean equipadas con grandes membranas entre sus dedos, serpientes de árbol con cuerpos aplastados que retienen el aire, lagartos con colgajos a lo largo de sus cuerpos, y diversas clases de mamíferos que planean gracias a la presencia de membranas que se extienden entre sus miembros, y que nos muestran el camino que debieron de seguir los murciélagos en sus comienzos. Contrariamente a lo expresado en la literatura creacionista, no sólo son frecuentes los animales con «medias alas», sino también los animales con un cuarto de ala, tres cuartos de ala, y así sucesivamente. La idea de un espectro continuo de maneras de volar se torna aún más persuasiva cuando recordamos que los animales muy pequeños tienden a flotar suavemente en el aire, con independencia de su tamaño. El motivo por lo que esto resulta convincente es que hay un espectro continuo con infinitas gradaciones entre lo pequeño y lo grande.

La idea de la existencia de cambios diminutos acumulados a lo largo de muchos estadios es muy poderosa, capaz de explicar un enorme rango de cosas que de otra forma resultarían inexplicables. ¿Cómo se originó el veneno en las serpientes? Muchos animales muerden, y su saliva contiene proteínas que, si penetran en una herida, pueden producir una reacción alérgica. Incluso las llamadas serpientes no venenosas pueden producir mordeduras que originan reacciones dolorosas en algunas personas. Existe una serie continua, gradual, desde la saliva ordinaria hasta el veneno mortal

¿Cómo se originaron las orejas? Cualquier trozo de piel puede detectar vibraciones, si entra en contacto con un objeto que vibre. Esto es consecuencia del sentido del tacto. La selección natural podría haber intensificado esta facultad de una manera gradual, hasta que fuese lo suficientemente sensible como para captar vibraciones muy *ligeras*. En este momento, tendría la sensibilidad necesaria como para captar vibraciones transmitidas *por el aire* que fuesen lo adecuadamente fuertes o estuviesen lo su-

ficientemente cercanas a su origen. La selección natural favorecería entonces la evolución de unos órganos especiales, las orejas, para captar estas vibraciones transmitidas por el aire, y originadas a partir de distancias que irían aumentando de forma continua. Es fácil ver que debe de haber habido una trayectoria continúa de mejoras, paso a paso, hasta el final. ¿Cómo se originó la ecolocalización? Cualquier animal que pueda oír, puede oír ecos. Los ciegos aprenden a utilizar estos ecos. Una versión rudimentaria de esta habilidad en los antepasados de los mamíferos podría haber suministrado suficiente materia prima como para que la selección natural actuase, desembocando, mediante etapas graduales, en la elevada perfección de los murciélagos.

Un cinco por ciento de visión es mejor que nada. Un cinco por ciento de audición es mejor que nada. Un cinco por ciento de cualquier eficiencia en el vuelo es mejor que nada. Es posible que cada órgano o aparato que vemos en la actualidad sea el producto de una trayectoria uniforme a través del espacio animal, una trayectoria en la que cada estadio intermedio contribuyó a la supervivencia y a la reproducción. Dondequiera que tengamos un X en un animal real vivo, y X sea un órgano demasiado complejo como para haberse originado aleatoriamente en una sola etapa, entonces, de acuerdo con la teoría de la evolución por selección natural, se daría el caso de que una fracción de X sería mejor que nada; y dos fracciones de X serían mejor que una; y un X completo mejor que nueve décimas de X. No encuentro problema alguno en aceptar que estas afirmaciones sean ciertas en el caso de los ojos, las orejas, incluyendo las orejas de los murciélagos, las alas, los insectos que se camuflan o muestran algún mimetismo, las mandíbulas de las serpientes, los aguijones, los hábitos de los cuclillos y el resto de los ejemplos mostrados por la propaganda antievolucionista. No hay duda de que pueden *concebirse* muchos X en los que estas afirmaciones no serían ciertas, muchas vías evolutivas en las que los estadios intermedios no serían mejores que sus predecesores. Pero estos X no se encuentran en el mundo real.

Darwin escribió (en *El origen de las especies*):

> Si pudiese demostrarse que ha existido algún órgano que no hubiese podido formarse por una sucesión de ligeras modificaciones, mi teoría se vendría abajo.

Ciento veinticinco años después, sabemos mucho más sobre animales y plantas que Darwin, y todavía no conozco ningún caso de un órgano complejo que no hubiese podido ser formado por una sucesión de ligeras modificaciones. No creo que llegue a encontrarse. Si existe, tendría que ser un órgano *realmente* complejo y, como veremos en capítulos posteriores, hay que ser muy sofisticado en lo que se refiere al significado de «ligeras modificaciones» para creer en el darwinismo.

Algunas veces, la historia gradual de los estadios intermedios está escrita claramente en la forma que tienen los animales actuales, incluso en forma de francas imperfecciones en el diseño final. Stephen Gould, en su excelente ensayo *El pulgar del Panda (The Panda's Thumb)*, insiste en que la evolución puede defenderse con más fuerza con la evidencia que supone la descripción de las imperfecciones que con la evidencia de la perfección. Pondré sólo dos ejemplos.

Los peces que viven en el fondo del mar se benefician al ser planos y navegar ayudados por su forma. Hay dos clases de peces planos muy distintos, que viven en el fondo del mar, en los que la forma plana ha evolucionado de manera bastante diferente. Las mantas y las rayas, parientes de los tiburones, se han ido aplanando, siguiendo lo que podríamos llamar el camino obvio. Sus cuerpos han producido excrecencias laterales en forma de grandes «alas». Son como tiburones a los que hubiese pasado por encima una apisonadora de vapor, dejándolos simétricos y «bien ordenados en sentido vertical». La acedía, el lenguado, el hipogloso y sus parientes se han aplanado de una manera diferente. Son peces de esqueleto óseo (con vejiga natatoria) relacionados con los arenques, las truchas, etc., y no tienen nada que ver con los tiburones. A diferencia de éstos, los peces de esqueleto óseo tienen una marcada tendencia a estar aplanados en sentido vertical. Un arenque es, por ejemplo, mucho más «alto» que ancho. Utiliza todo su cuerpo, aplanado en sentido vertical, como superficie natatoria, imprimiéndole un movimiento ondulante según va nadando en el agua. Es natural, por tanto, que cuando los antepasados de la acedía y del lenguado se posesionaron del fondo del mar, descansaran sobre un *lado* mejor que sobre el vientre, como lo hacían los antepasados de las mantas y las rayas. Sin embargo, esto originó un problema, ya que al estar uno de los ojos mirando siempre hacia abajo, hacia la arena, su utilidad era prácticamente nula. Este problema se resolvió durante la evolución, «moviendo» el ojo alrededor, desde el lado inferior hacia el borde superior.

Este proceso de desplazamiento volvemos a verlo representado durante el desarrollo de los peces óseos planos. Un pez plano joven comienza su vida nadando cerca de la superficie, siendo entonces simétrico y aplanado en sentido vertical, como un arenque. Luego el cráneo empieza a crecer de manera extraña, asimétrica, torcida; así, un ojo, por ejemplo el izquierdo, se

mueve sobre la parte superior de la cabeza para terminar al otro lado. El pez joven se asienta entonces en el fondo del mar, con sus dos ojos mirando hacia arriba, una extraña visión picasiana. Incidentalmente, unas especies de peces planos se asientan sobre el lado derecho, otras sobre el izquierdo, y otras, sobre cualquiera de los dos lados.

El cráneo entero de un pez óseo plano retiene la evidencia torcida y distorsionada de sus orígenes. Su imperfección es un poderoso testimonio de su antigua historia, una historia de cambios paso a paso más que de un diseño deliberado. Ningún diseñador sensible hubiese creado tal monstruosidad, si hubiese tenido mano libre para crear un pez plano en una mesa de dibujo. Sospecho que la mayoría de los diseñadores con cierta sensibilidad hubiesen pensado en términos más de acuerdo con la manta. Pero la evolución no empieza nunca a partir de una mesa de dibujo vacía. Tiene que comenzar a partir de lo que hay. En el caso de los antepasados de las mantas eran los tiburones que nadaban libremente. Los tiburones en general no están aplanados en sentido lateral como lo están los peces óseos, como el arenque; si acaso, están ligeramente aplanados en sentido horizontal. Esto significa que cuando algunos tiburones primitivos se posesionaron del fondo del mar, hubo una progresión uniforme hacia la forma de la manta, representando cada forma intermedia una ligera mejora, dadas las condiciones del fondo del mar, sobre su predecesor ligeramente menos aplanado.

Por el contrario, cuando los antepasados de la acedía y del hipogloso se asentaron en el fondo del mar, al estar aplanados lateralmente en sentido vertical, como los arenques, les era mucho más fácil descansar sobre uno de sus lados que balancearse precariamente sobre el borde afilado de su vientre. Aun cuando su curso evolutivo estaba eventualmente destinado a conducirles hacia la complicada, y probablemente costosa distorsión que implica tener los dos ojos en un lado, aunque la forma de un pez plano como la manta podría haber sido también, *en última instancia*, el mejor diseño para un pez óseo, las formas intermedias potenciales que surgieron a lo largo de este trayecto evolutivo prosperaron aparentemente menos a corto plazo que las formas rivales que descansaban sobre su costado. Éstas fueron mucho más eficaces, a corto plazo, navegando por el fondo. En el hiperespacio genético, hay una trayectoria uniforme que conecta los antepasados de los peces óseos con los peces planos que descansaban sobre su costado y tenían el cráneo torcido. No hay una trayectoria uniforme que los conecte con los peces planos que descansaban sobre su vientre. En teoría, esta trayectoria existe pero pasa a través de formas intermedias que no habrían tenido éxito —a corto plazo, que es lo que importa— si hubiesen llegado a existir.

El segundo ejemplo de progresión evolutiva que no llegó a producirse, a causa de las desventajas mostradas por las formas intermedias, aun cuando podría haber resultado superior en último extremo si se hubiese producido, se refiere a la retina de nuestros ojos (y del resto de los vertebrados). Como cualquier otro nervio, el nervio óptico es un cable gordo, un haz de cables separados «aislados», en nuestro caso, unos tres millones. Cada uno de estos tres millones de cables conectan una célula de la retina con el cerebro. Podemos imaginárnoslos conectando un banco de tres millones de fotocélulas (en realidad, tres millones de estaciones de relés que recogen información de un número de fotocélulas aún mayor) con el ordenador destinado a procesar la información en el cerebro. Por este motivo, todos los cables de la retina se reúnen en un solo haz que constituye el nervio óptico de ese ojo.

Cualquier ingeniero asumiría que las fotocélulas apuntan hacia la luz, con sus cables dirigidos hacia atrás, hacia el cerebro. Se reiría de cualquier sugerencia que apuntase en sentido contrario, con los cables partiendo del lado más *cercano* a la luz. Y aun así, esto es exactamente lo que sucede en las retinas de todos los vertebrados. Cada fotocélula está, en efecto, enfocada hacia atrás, con su cable asomando por el lado más cercano a la luz. El cable tiene que recorrer la superficie de la retina, hasta un punto en el que se hunde a través de un agujero (la llamada «mancha ciega») para unirse con otros y formar el nervio óptico. Eso significa que la luz, en lugar de tener garantizado un paso sin restricciones hasta las fotocélulas, tiene que pasar a través de un bosque de conexiones, sufriendo, por lo menos, alguna atenuación y distorsión (en realidad, probablemente no demasiada, pero aun así, es la cuestión de *principio* lo que ofendería a cualquier ingeniero con una mente ordenada).

No conozco la explicación exacta de esta extraña situación. El período relevante de la evolución está muy lejano. Pero estoy dispuesto a apostar que tuvo algo que ver con la trayectoria, el trayecto a través de la vida real equivalente a la Tierra de las Bioformas, que tendría que haberse recorrido para volver la retina del derecho, a partir de cualquiera que fuese el órgano ancestral que precedió al ojo. Probablemente, esta trayectoria hipotética existe, pero cuando se realizó en los cuerpos de los animales intermedios, resultó tener desventajas, temporales, aunque esto es suficiente. Las formas intermedias podrían ver incluso peor que sus imperfectos antepasados, ¡y no sería un consuelo pensar que estaban construyendo unos ojos mejores para sus

descendientes remotos! Lo que importa es la supervivencia aquí y ahora.

La «ley de Dollo» afirma que la evolución es irreversible. Esto se confunde, a menudo, con una gran cantidad de necedades idealistas sobre lo inevitable del progreso, unido con frecuencia a una estúpida ignorancia sobre la evolución «que viola el segundo principio de termodinámica» (aquellos que pertenecen al cincuenta por ciento de población culta que, de acuerdo con el novelista C. P. Snow, sabe lo que es el segundo principio, se darán cuenta de que no está más violado por la evolución que por el crecimiento de un niño). No hay razón por la que debiera invertirse la tendencia general de la evolución. Si existe una tendencia hacia las astas grandes durante un tiempo, es fácil que pueda haber una tendencia hacia las astas pequeñas en otro momento. La ley de Dollo es sólo una afirmación sobre la improbabilidad estadística de seguir exactamente la misma trayectoria evolutiva dos veces (o, cualquier trayectoria *determinada*), en cualquier dirección. Un paso de una sola mutación puede invertirse con facilidad. Pero si hay numerosos pasos mutacionales, incluso en el caso de las bioformas con sus nueve pequeños genes, el espacio matemático de todas las trayectorias posibles es tan vasto que la probabilidad de que dos trayectorias lleguen a un mismo punto se torna extremadamente pequeña. Esto es aún más cierto en los animales reales con un elevado número de genes. No hay nada misterioso ni místico sobre la ley de Dollo, ni tampoco es algo que debamos salir a «probar» en la naturaleza. Simplemente, sigue las leyes elementales de las probabilidades.

Por la misma razón, es muy poco probable que el mismo trayecto evolutivo sea recorrido dos veces. Y parece también poco probable, por las mismas razones estadísticas, que dos líneas de evolución converjan exactamente en el mismo punto final, desde distintos puntos de partida.

Constituyen, por tanto, el testimonio más llamativo del poder de la selección natural, los numerosos ejemplos que encontramos en la vida real, en los que líneas de evolución independientes han convergido desde puntos de partida muy distintos, en lo que parece ser un mismo punto final. Cuando los examinamos detenidamente, encontramos —sería preocupante si no fuera así— que la convergencia no es total. Las diferentes líneas de evolución dejan ver sus orígenes independientes en numerosos detalles. Por ejemplo, los ojos de los pulpos son muy parecidos a los nuestros, pero los cables que salen de sus fotocélulas no apuntan hacia la luz, como los nuestros. A este respecto, están diseñados con una mayor «sensibilidad». Han llegado a

un punto final similar, desde un punto de partida muy distinto. Y el hecho se revela en detalles como éste.

Este tipo de semejanzas que convergen superficialmente son sorprendentes, por lo que dedicaré el resto del capítulo a describir algunas de ellas. Constituyen la demostración más impresionante del poder que tiene la selección natural para reunir buenos diseños. Y, aun así, el hecho de que diseños similares sean también superficialmente diferentes, testimonia la independencia de sus orígenes e historia evolutiva. El razonamiento básico es que, si un diseño es lo suficientemente bueno para evolucionar una vez, el mismo *principio* sería suficientemente bueno para evolucionar dos veces, desde distintos puntos de partida, en diferentes partes del reino animal. En ningún lugar está mejor ilustrado que en el caso que utilizamos para nuestra ilustración básica de un buen diseño: la ecolocalización.

Casi todo lo que sabemos sobre ecolocalización procede de los murciélagos (y de los instrumentos humanos), pero también sucede en otros animales que no guardan ninguna relación entre sí. La utilizan, por lo menos, dos grupos lejanos de pájaros, y ha alcanzado un nivel muy elevado de sofisticación en los delfines y las ballenas. Por otra parte, fue «descubierto» casi con certeza por dos grupos de murciélagos diferentes. Los pájaros que la utilizan son los guácharos de Sudamérica, y los «*cave-swiftlets*» del Extremo Oriente, los mismos cuyos nidos se utilizan para hacer la sopa de nidos de pájaro. Ambos tipos de pájaros construyen sus nidos en cuevas profundas, donde penetra poca o ninguna luz, y ambos navegan a través de la oscuridad más absoluta, utilizando ecos de sus propios sonidos vocales. En ambos casos, los sonidos son audibles para los humanos, no son ultrasonidos como los sonidos más especializados de los murciélagos. Por supuesto, ninguna de estas especies de pájaros parece haber desarrollado la ecolocalización hasta el extremo de sofisticación que lo han hecho los murciélagos. Sus sonidos no son de FM, ni tampoco parecen adecuados para medir la velocidad mediante el efecto Doppler. Probablemente, como el *Rousettus*, miden el tiempo que dura el intervalo silencioso entre cada sonido y su eco.

En este caso, podemos estar absolutamente seguros de que las dos especies de pájaros han inventado la ecolocalización independientemente de los murciélagos, e independientemente entre sí. La línea de razonamiento es del tipo que los evolucionistas utilizan con frecuencia. Contemplemos los miles de especies de pájaros, y observemos que la inmensa mayoría de ellos no utilizan ecolocalización. Sólo lo hacen dos pequeños géneros aislados, que lo único que tienen en común es el hecho de

que ambos viven en cuevas. Aunque creamos que los pájaros y los murciélagos han tenido un antepasado común, si seguimos sus descendencias lejos en el pasado, este antepasado común sería también el antepasado común de todos los mamíferos (incluyéndonos nosotros mismos) y de todos los pájaros. La inmensa mayoría de los mamíferos y de los pájaros no utilizan la ecolocalización, y es muy probable que su antepasado común tampoco lo hiciera (tampoco volaba, que es otra de las tecnologías que ha evolucionado independientemente varias veces). De aquí se deduce que la tecnología de la ecolocalización ha sido desarrollada por separado en murciélagos y pájaros, de la misma forma que fue desarrollada independientemente por científicos americanos, ingleses y alemanes. El mismo tipo de razonamiento, a menor escala, nos conduce a la conclusión de que el antepasado común del guácharo y del «cave-swiftlet» tampoco utilizaba la ecolocalización, y que estos dos géneros han desarrollado la misma tecnología por separado.

Entre los mamíferos, los murciélagos no son el único grupo que ha desarrollado por separado la tecnología de la ecolocalización. Varias clases distintas de mamíferos, por ejemplo, las musarañas, ratas y focas, utilizan los ecos en cierta medida, como lo hacen las personas ciegas, pero los únicos animales que rivalizan con los murciélagos en sofisticación son las ballenas. Éstas se dividen en dos grandes grupos, ballenas con dientes y ballenas con ballenas. Ambas, por supuesto, son mamíferos descendientes de antepasados que vivían en tierra firme, y puede que «hayan inventado» la forma de vida «estilo ballena» independientemente, a partir de diferentes antepasados terrestres. Las ballenas con dientes incluyen los cachalotes, las orcas y las diferentes especies de delfines, todos los cuales cazan presas relativamente grandes, como peces y calamares, que cogen con sus mandíbulas. En algunas de estas ballenas con dientes, entre las cuales sólo han sido estudiados a fondo los delfines, han evolucionado equipos sofisticados de sonar en sus cerebros.

Los delfines emiten encadenamientos rápidos de sonidos de tonos agudos, algunos audibles para nosotros, y otros ultrasónicos. Es probable que el «huevo», la masa prominente situada en su frente, que se parece –agradable coincidencia– a la extraña cúpula del radar que sobresale en los aviones de vigilancia Nimrod para «prevención de ataques» (*advance-warning*), tenga algo que ver con la emisión de las señales del sonar, aunque no se comprende cómo funciona en realidad. Como en el caso de los murciélagos, tiene un ritmo de sonidos «lento» de crucero, que se eleva hasta constituir un zumbido de alta frecuencia (400 sonidos por segundo) cuando el animal se acerca a una presa.

Aun así el ritmo «lento» de crucero es bastante rápido. Los delfines de río que viven en aguas pantanosas son probablemente los más hábiles en el uso de la ecolocalización, pero algunos delfines de mar abierto han demostrado en las pruebas que son también bastante eficaces. Un delfín de los descritos con nariz en forma de botella, del Atlántico, puede discriminar círculos, cuadrados y triángulos (todos con una misma área estandarizada), utilizando su sonar. Puede decir qué objeto está más cerca, con una diferencia de 3 centímetros, a una distancia media de 6 metros. Puede detectar una esfera de acero del tamaño de la mitad de una pelota de golf, a una distancia de 55 metros. Este logro no es tan bueno como la *visión* humana con buena luz, pero es probablemente mejor que la visión humana a la luz de la luna.

Se ha hecho la intrigante sugerencia de que los delfines tendrían, si decidiesen utilizarlo, un medio potencial de comunicarse «imágenes mentales» sin ningún esfuerzo. Todo lo que tendrían que hacer es utilizar sus versátiles voces para imitar el patrón de sonido que producirían los ecos de un objeto determinado. De esta manera, podrían transmitirse imágenes mentales de dichos objetos. No hay ninguna evidencia que confirme esta deliciosa sugerencia. Teóricamente, los murciélagos podrían hacer lo mismo, pero los delfines parecen los candidatos más probables porque, en general, son más sociables. Son también probablemente más «listos», pero ésta no es necesariamente una consideración importante. Los instrumentos necesarios para comunicar imágenes de ecos no son más sofisticados que los que tienen ya los murciélagos y los delfines para la ecolocalización. Y parece que podría existir un espectro continuo gradual, y fácil, entre la utilización de la voz para producir ecos y la utilización para imitarlos.

Así pues, por lo menos dos grupos de murciélagos, dos grupos de pájaros, las ballenas dentadas, y probablemente otras clases de mamíferos, en menor extensión, han convergido independientemente en un momento dado en la tecnología del sonar, durante los últimos cientos de millones de años. No tenemos forma de saber si esta tecnología evolucionó también por separado en algún otro animal ahora extinguido, ¿quizá los pterodáctilos?

No se ha encontrado hasta ahora ningún insecto ni ningún pez que utilicen el sonar, pero dos grupos bastante distintos de peces, uno en Sudamérica y otro en África, han desarrollado un sistema de navegación bastante similar, que parece ser casi igual de sofisticado y que puede contemplarse como una solución relacionada, aunque distinta, con un mismo problema. Son los lla-

mados peces débilmente eléctricos. La palabra «débil» es para diferenciarlos de los peces fuertemente eléctricos, que utilizan el campo eléctrico, no para navegar, sino para aturdir a su presa. Incidentalmente, la técnica de aturdimiento ha sido inventada independientemente por varios grupos de peces que no tienen relación entre sí, por ejemplo, las «anguilas» eléctricas (que no son verdaderas anguilas, pero cuya forma es convergente con la de las anguilas verdaderas), y las rayas eléctricas.

Los peces débilmente eléctricos de Sudamérica y África guardan muy poca relación entre sí, pero ambos viven en el mismo tipo de aguas en sus respectivos continentes, demasiado turbias para que la visión sea eficaz. El principio físico que explotan –los campos eléctricos en el agua– es aún más ajeno a nuestro conocimiento que el de los murciélagos y los delfines. Tenemos por lo menos una idea subjetiva de lo que es un eco, pero prácticamente no la tenemos de lo que podría ser percibir un campo eléctrico. No conocíamos ni siquiera la existencia de la electricidad hasta hace un par de siglos. No podemos, como seres humanos, sentir simpatía por los peces eléctricos, pero podemos, como físicos, comprenderlos.

Es fácil ver en el plato cómo están ordenados los músculos laterales de cada pez, formando una hilera de segmentos, una *batería* de unidades musculares. En la mayoría de los peces, se contraen sucesivamente, proyectando el cuerpo en forma de ondas sinuosas y empujándolo hacia adelante. Los peces eléctricos, tanto los débiles como los fuertes, han llegado a transformarse en una batería eléctrica. Cada segmento («célula») de la batería genera un voltaje. Los voltajes están conectados en serie a lo largo de toda la longitud del pez, de manera que, en un pez fuertemente eléctrico como la anguila eléctrica, la batería completa genera una corriente de 1 amperio y 650 voltios. Esto tiene la suficiente potencia como para poner fuera de combate a un hombre. Los peces débilmente eléctricos no necesitan voltajes ni intensidades de corriente tan elevados para sus fines, que consisten, puramente, en recoger información.

El principio de la electrolocalización, como se le ha denominado, se comprende bastante bien a nivel de la física, aunque no, por supuesto, a nivel de lo que se sentiría al ser como un pez eléctrico. La descripción siguiente se aplica de igual forma a las dos variedades: la convergencia es así de profunda. La corriente eléctrica fluye hacia el agua, desde la mitad anterior del pez, formando líneas que se curvan hacia atrás y vuelven a entrar por el extremo de la cola del pez. No hay realmente «líneas» discontinuas sino un «campo» continuo, un envoltorio invisible eléctrico que rodea el cuerpo del pez. Sin embargo, para

la visualización humana es más fácil pensar en términos de un conjunto de líneas curvas, abandonando el pez a través de una serie de agujeros de salida espaciados a lo largo de la mitad anterior del cuerpo, curvándose todas alrededor en el agua y hundiéndose de nuevo en el pez a través del extremo de su cola. El pez es el equivalente de un diminuto voltímetro que controla el voltaje de cada «puerta». Si se suspende el pez en el agua, sin ningún obstáculo alrededor, las líneas serán perfectamente curvas. Los diminutos voltímetros de cada puerta registrarán los voltajes como normales. Pero si aparece algún obstáculo en la vecindad, digamos, una roca o un trozo de alimento, las líneas de corriente que tropiecen con el obstáculo cambiarán. Esto modificará el voltaje de aquellas puertas cuya línea de corriente resulte afectada, y el hecho será registrado por los voltímetros apropiados. Así pues, en teoría, un computador que comparase el patrón de voltajes registrado por todos los voltímetros de los agujeros de salida, podría determinar el patrón de los obstáculos alrededor del pez. Esto es, según parece, lo que hace el cerebro del pez. Una vez más, no significa que los peces sean matemáticos inteligentes. Tienen un aparato que resuelve las ecuaciones necesarias, de la misma manera que nuestro cerebro resuelve inconscientemente las ecuaciones cada vez que atajamos una pelota.

Es muy importante que el cuerpo del pez se mantenga rígido. El computador cerebral no podría hacer frente a la distorsión adicional que se introduciría, si el cuerpo del pez se doblase y retorciese como el de un pez ordinario. Los peces eléctricos han acertado, por lo menos dos veces aisladas, con este ingenioso método de navegación, pero han tenido que pagar un precio: renunciar a la forma normal de nadar de los peces, más eficiente, que proyecta todo el cuerpo en forma de ondas serpenteantes. Han resuelto el problema manteniendo el cuerpo rígido como un atizador, e incorporando una larga aleta única, situada a todo lo largo del cuerpo. De esta manera, en lugar de proyectarse el cuerpo en forma de ondas, esta aleta lo hace de forma longitudinal. La progresión del pez en el agua es bastante lenta, pero se mueve y, aparentemente, el sacrificio de una mayor velocidad merece la pena: las mejoras en la navegación parecen superar esta pérdida de velocidad. De manera fascinante, los peces eléctricos de Sudamérica han encontrado casi la misma solución que los africanos, pero no con la misma eficiencia. La diferencia es reveladora. Ambos grupos han desarrollado una larga aleta única, que recorre el cuerpo en toda su longitud, pero en el pez africano ésta corre a lo largo del lomo mientras que en el pez sudamericano lo hace a lo largo del vientre. Esta clase

de diferencias en los detalles es muy característica de la evolución convergente, como hemos visto. Es también característica de los diseños convergentes de los ingenieros humanos.

Aunque la mayoría de los peces débilmente eléctricos, tanto en el grupo africano como en el sudamericano, producen sus descargas eléctricas en forma de pulsos discontinuos, y se denominan especies «pulsátiles», una minoría en ambos grupos lo hacen de manera diferente y se denominan especies «ondulantes». No trataré esta diferencia con mayor profundidad. Lo que resulta interesante en este capítulo es que la división pulso/onda ha evolucionado dos veces, de forma independiente, en grupos del Nuevo Mundo y del Viejo Mundo que no guardan ninguna relación entre sí.

Uno de los ejemplos más llamativos de evolución convergente que conozco está relacionado con las denominadas cigarras de aparición periódica. Antes de exponer este caso de convergencia, debo intercalar alguna información de fondo. Muchos insectos muestran una separación bastante rígida entre un estadio juvenil en el que se alimentan, y en el que pasan la mayor parte de sus vidas, y un estadio adulto relativamente breve de reproducción. Las moscas de mayo, por ejemplo, pasan la mayor parte de sus vidas como larvas, alimentándose debajo del agua, luego salen al aire durante un solo día, en el cual comprimen toda su vida de adultos. Podemos imaginarnos al adulto como la semilla efímera alada de una planta similar al sicomoro, y a la larva como la planta principal, radicando la diferencia en que el sicomoro fabrica muchas semillas y las deja caer a lo largo de muchos años, mientras que una larva de mosca de mayo da origen a un solo adulto justo al final de su propia vida. De cualquier forma, las cigarras de aparición periódica han llevado el curso de la mosca de mayo a su extremo. Los adultos viven unas pocas semanas, pero el estadio «juvenil» (técnicamente, ninfas más que larvas) dura 13 años (en algunas variedades) o 17 años (en otras). Los adultos emergen casi al mismo tiempo, después de haber estado 13 (o 17) años enclaustrados bajo tierra. Las plagas de cigarras, que tienen lugar en un área determinada con 13 (o 17) años exactos de diferencia, son erupciones espectaculares que han conducido a que se las denomine incorrectamente «langostas» (*locusts*) en la lengua vernácula americana. Las variedades se conocen como cigarras de 13 años y cigarras de 17 años.

Ahora bien, aquí está el hecho realmente extraordinario. Resulta que no hay sólo una especie de cigarra de 13 años y otra de 17 años. Hay tres especies, y cada una de ellas tiene una variedad o raza de 17 años y otra de 13 años. Se ha llegado por

separado a la división en una variedad de 13 y otra de 17 años, por lo menos tres veces. ¿Por qué? No lo sabemos. La única sugerencia que ha aportado alguien sobre lo que hay de especial en el 13 y en el 17, en contraposición con el 14, 15 y 16, es que son números primos. Un número primo es un número que no es divisible por ningún otro. La idea es que una especie de animales que irrumpe regularmente en forma de plagas se beneficia «abrumando» y haciendo morir de hambre alternativamente a sus enemigos, depredadores y parásitos. Si estas plagas están cronometradas para tener lugar en ciclos que duran un número primo de años, dificultan a sus enemigos la sincronización de sus propios ciclos vitales. Si las cigarras irrumpiesen cada 14 años, por ejemplo, esto podría ser utilizado por una especie de parásitos con un ciclo vital de siete años. Ésta es una idea extravagante, pero no lo es más que el propio fenómeno. No sabemos realmente qué hay de especial en los años 13 y 17. Lo que importa aquí, para nuestros fines, es que debe de haber *algo* especial sobre estos números, para que tres especies distintas de cigarras hayan convergido independientemente en ellos.

Los ejemplos de convergencia a gran escala tienen lugar cuando dos o más continentes han estado aislados uno del otro durante un largo período de tiempo, y hay animales que, sin tener ninguna relación, adoptan un rango de «ocupaciones» paralelo en cada uno de ellos. Por «ocupaciones» quiero significar formas de vida, como hacer túneles para los gusanos, cavar para las hormigas, cazar grandes animales herbívoros, comer hojas en lo alto de los árboles. Un buen ejemplo es la evolución convergente de «ocupaciones» en los mamíferos de los continentes de Sudamérica, Australia y el Viejo Mundo.

Estos continentes no estuvieron siempre separados. Debido a que nuestras vidas se miden en décadas, e incluso nuestras civilizaciones y dinastías se miden sólo en siglos, estamos acostumbrados a pensar en el mapa del mundo, es decir los límites de los continentes, como si fuesen fijos. La teoría de que los continentes se separaron moviéndose a la deriva fue propuesta hace tiempo por el geofísico alemán Alfred Wegener, aunque la mayoría de la gente se rió de él hasta pasada la segunda guerra mundial. El hecho admitido de que Sudamérica y África parecen las piezas separadas de un rompecabezas fue asumido como una divertida coincidencia. En una de las más rápidas y completas revoluciones que ha conocido la ciencia, la teoría anteriormente controvertida de la «deriva continental» llegó a ser universalmente aceptada, con el nombre de placas tectónicas. La evidencia de que los continentes han ido a la deriva, de que, por ejemplo, Sudamérica se desgajó realmente de África, es

ahora literalmente aplastante, pero éste no es un libro de geología. Para nosotros, lo importante es que la escala de tiempo durante la cual los continentes fueron a la deriva es la misma escala lenta de tiempo en la que han evolucionado las descendencias de los animales, y que no podemos ignorar la deriva continental si queremos comprender los patrones de la evolución animal en esos continentes.

Por consiguiente, hasta hace cerca de unos 100 millones de años, Sudamérica estaba unida a África por el este y a la Antártida por el sur. La Antártida estaba unida a Australia, y la India estaba unida a África a través de Madagascar. Había, de hecho, un inmenso continente en el sur, que llamamos Pangea, formado por lo que es ahora Sudamérica, África, Madagascar, India, Antártida y Australia, todos reunidos en uno. Había también un enorme continente único en el norte llamado Laurasia, formado por lo que es ahora América del Norte, Groenlandia, Europa y Asia (excepto la India). Norteamérica no estaba unida a Sudamérica. Hace alrededor de unos 100 millones de años hubo una gran rotura de estas masas de tierra, y los continentes se fueron moviendo lentamente desde entonces hasta sus posiciones actuales (y continuarán, por supuesto, haciéndolo en el futuro). África se unió con Asia a través de Arabia y entró a formar parte del inmenso continente del que ahora hablamos como el Viejo Mundo. Norteamérica se alejó de Europa a la deriva, la Antártida se alejó hacia el sur, hasta su localización helada actual. La India se desprendió de África y partió a través de lo que ahora se llama el océano Índico, para estrellarse con el sur de Asia y producir la elevación de los Himalayas. Australia se alejó de la Antártida hacia el mar abierto para transformarse en una isla-continente, a kilómetros de distancia de cualquier otra parte.

La fragmentación del gran continente de Pangea en el sur comenzó durante la era de los dinosaurios. Cuando Sudamérica y Australia se desprendieron del resto del mundo para empezar sus largos períodos de aislamiento, cada uno llevaba su propia carga de dinosaurios, y también de algunos animales menos conocidos, que llegarían a ser los antepasados de los mamíferos modernos. Cuando, mucho más adelante, por razones que no comprendemos y que están sujetas a una especulación muy provechosa, los dinosaurios (con excepción del grupo que llamamos ahora pájaros) se extinguieron, ocurrió en todo el mundo. Este hecho dejó un vacío en las «ocupaciones» abierto a los animales terrestres. El vacío fue llenado en su mayor parte por los mamíferos, a lo largo de un período de millones de años de evolución. Aquí, lo interesante para nosotros es que fueron tres

vacíos independientes, llenados por separado por mamíferos en Australia, Sudamérica y el Viejo Mundo.

Los mamíferos primitivos que estaban presentes en las tres áreas cuando los dinosaurios dejaron más o menos simultáneamente vacías sus ocupaciones, eran bastante pequeños e insignificantes, probablemente de vida nocturna, eclipsados y dominados por los dinosaurios. Podían haber evolucionado en direcciones radicalmente distintas en las tres áreas. Y, en cierta medida, es lo que sucedió. No hay nada en el Viejo Mundo que se parezca al perezoso gigante de las tierras de Sudamérica, hoy extinguido. La enorme variedad de mamíferos sudamericanos incluía un conejillo de indias gigante, hoy extinguido, del tamaño de un rinoceronte actual y que, sin embargo, era un roedor (tengo que decir un rinoceronte «actual» porque la fauna del Viejo Mundo incluía un rinoceronte gigante del tamaño de una casa de dos pisos). Pero aunque los continentes separados produjeron cada uno sus mamíferos únicos, el patrón general de la evolución en las tres áreas fue el mismo. En cada una de ellas los mamíferos presentes al comienzo se extendieron durante la evolución y produjeron un especialista para cada ocupación que, en muchos casos, llegaron a mostrar una semejanza extraordinaria con los especialistas correspondientes de las otras dos áreas. Cada ocupación, la de hacer túneles, la de cazar grandes animales, la de pastar en las planicies, etc., fue objeto de una evolución convergente e independiente en dos o tres de los continentes separados. Además de estos tres grandes sitios, las islas más pequeñas, como Madagascar, tienen también sus propias historias evolutivas independientes y paralelas propias, de las que no me ocuparé ahora.

Dejando de lado los extraños mamíferos que ponen huevos en Australia —el ornitorrinco con pico de pato y el oso hormiguero espinoso— los mamíferos modernos pertenecen a uno de dos grandes grupos: los marsupiales (cuyas crías nacen muy pequeñas y son mantenidas en una bolsa) y los placentarios (el resto). Los marsupiales llegaron a dominar la historia australiana y los placentarios el Viejo Mundo, mientras que los dos grupos jugaron papeles importantes uno al lado del otro en Sudamérica. La historia sudamericana se complica por el hecho de haber estado sujeta a olas de invasiones de los mamíferos procedentes del norte de América.

Después de situar la escena, podemos contemplar ahora algunas de las ocupaciones y de las convergencias. Una ocupación importante estaba relacionada con el aprovechamiento de las grandes tierras verdes, conocidas en sus diversas formas como la pradera, la pampa, la sabana, etc. Entre los que practicaban

esta ocupación estaban los caballos (las principales especies africanas se llaman cebras, y las del desierto, asnos), y los animales de pasto, como el bisonte norteamericano, cazado en la actualidad hasta casi el borde de su extinción. Los herbívoros tienen intestinos normalmente muy largos, que contienen varios tipos de bacterias fermentadoras, ya que la hierba es un alimento pobre y necesita mucha digestión. En lugar de distribuir su alimentación en comidas separadas, comen de una forma más o menos continua. A través de ellos, fluyen como un río enormes cantidades de plantas, durante todo el día. Los animales suelen ser muy grandes, y viajan en grandes rebaños. Cada uno de estos grandes herbívoros es una montaña de apreciado alimento para cualquier depredador que lo pueda explotar. Como consecuencia de esto existe, como veremos, una ocupación dedicada a la difícil tarea de capturarlos y matarlos. Son los depredadores. Cuando digo «una» ocupación, quiero decir realmente la totalidad de las muchas «subocupaciones»: los leones, leopardos, leopardos indios, perros salvajes y las hienas cazan todos de una forma especializada. Esta misma clase de subdivisiones se encuentra en los herbívoros, y en todas las demás «ocupaciones».

Los herbívoros tienen unos sentidos muy agudizados, con los que están continuamente en estado de alerta frente a los depredadores, y son capaces de correr muy rápido para escapar de ellos. Con esta finalidad, suelen tener piernas largas, en forma de huso, y corren normalmente sobre las puntas de sus dedos, que se han vuelto alargadas y fuertes a lo largo de la evolución. Las uñas de estos dedos especializados son largas y duras, y se denominan pezuñas. Las vacas tienen dos dedos agrandados en la extremidad de cada pata: la familiar pezuña «hendida». Los caballos muestran lo mismo en gran medida, excepto que, probablemente por razones históricas accidentales, sólo corren sobre un dedo en lugar de dos. Éste se deriva de lo que era originariamente el dedo medio. Los otros dedos han desaparecido casi por completo a lo largo de la evolución, aunque ocasionalmente vuelvan a aparecer en casos de extraños «atavismos».

Sudamérica, como hemos visto, estaba aislada durante el período en el que los caballos y las reses de ganado evolucionaban en otras partes del mundo. Pero Sudamérica tiene sus propias tierras de pastos, y allí se produjo la evolución de sus propios grupos de grandes herbívoros, para explotar estos recursos. Hubo cantidades masivas de leviatanes parecidos a los rinocerontes pero sin conexión con ellos. Los cráneos de algunos de los primeros herbívoros sudamericanos sugieren que «inventaron» la trompa independientemente de los auténticos elefantes. Algunos parecían camellos, otros no se asemejaban a nada de

lo que hay sobre la tierra (hoy día), o eran como extrañas quimeras de animales actuales. Los litopternos eran increíblemente similares a los caballos, en sus patas, y aun así no tenían absolutamente ninguna relación con ellos. Esta semejanza superficial engañó a un experto argentino del siglo XIX, quien pensó, con un orgullo nacional disculpable, que eran los antepasados de todos los caballos del resto del mundo. De hecho, su parecido con los caballos era superficial y convergente. La vida en las tierras de pastos es casi igual alrededor de todo el mundo, y las mismas cualidades evolucionaron en los caballos y en los litopternos para enfrentarse con los problemas de estas tierras. Los litopternos, como los caballos, perdieron todos sus dedos, excepto el dedo medio de cada pata, que se agrandó como su articulación inferior y desarrollaron pezuñas. La pata de un litopterno es prácticamente indistinguible de la pata de un caballo y, a pesar de ello, los dos animales están sólo lejanamente relacionados.

En Australia los grandes herbívoros y los animales de pasto son muy diferentes. Los canguros tienen la misma necesidad de moverse rápidamente, pero lo hacen de una manera distinta. En lugar de desarrollar el galope a cuatro patas, hasta el grado tan elevado que lo hicieron los caballos (y, presumiblemente, los litopternos), perfeccionaron un tipo de marcha distinta: saltando sobre dos piernas con una gran cola que les sirve de balance. No merece la pena discutir cuál de estas dos marchas es «mejor». Cada una puede ser muy eficaz, si el cuerpo evoluciona de forma que la desarrolle en su totalidad. Los caballos y litopternos desarrollaron el galope a cuatro patas, y terminaron con unas patas casi idénticas. Los canguros desarrollaron el salto con dos patas, y terminaron con dos grandes patas traseras, que son únicas (por lo menos, desde los dinosaurios), y la cola. Los canguros y los caballos llegaron a diferentes puntos finales en el «espacio animal», probablemente a causa de alguna diferencia accidental en sus puntos de partida.

Volviendo a los devoradores de carne de los que huían los grandes herbívoros, encontramos algunas convergencias más fascinantes. En el Viejo Mundo estamos familiarizados con los grandes cazadores, como los lobos, perros, hienas y los grandes felinos: leones, tigres, leopardos y leopardos indios. Un gran felino que se ha extinguido recientemente es el tigre de dientes de sable, denominado así por sus colosales dientes caninos, que se proyectaban hacia abajo desde la mandíbula superior, y cuya presencia debe de haber ocasionado una experiencia terrorífica. Hasta hace poco tiempo, no había verdaderos felinos o perros en Australia o en el Nuevo Mundo (los pumas y los jaguares

han evolucionado, en los últimos tiempos, a partir de los felinos del Viejo Continente). Pero en estos dos continentes había marsupiales que eran equivalentes. En Australia, el yabí, o «lobo» marsupial (a menudo llamado lobo de Tasmania porque sobrevivió allí algo más de tiempo que en el continente australiano), fue situado trágicamente al borde de su extinción en un espacio de tiempo que todavía puede recordarse, sacrificados en enormes cantidades como una «plaga» o como «deporte» (hay una ligera esperanza de que pueda sobrevivir aún en algunas áreas remotas de Tasmania, áreas que se ven ellas mismas ahora amenazadas por la destrucción en interés de facilitar «empleo» a las personas). No hay que confundirlo con el dingo, que, dicho sea de paso, es un auténtico perro introducido en Australia más recientemente por el hombre (aborigen). Una película hecha en los años treinta sobre el último lobo marsupial conocido, paseando sin descanso por su jaula solitaria en el zoo, muestra un extraño animal parecido a un perro, con una naturaleza marsupial revelada únicamente por la forma distinta de sostener la pelvis y las patas traseras, posiblemente relacionada con el acomodo de la bolsa. Para cualquier amante de los perros, la contemplación de este enfoque alternativo al diseño de un perro, este viajero evolutivo a lo largo de un camino paralelo separado por 100 millones de años, este perro, en parte familiar, y en parte un perro mundano completamente extraño, es una experiencia conmovedora. Puede que fuesen una plaga para los seres humanos, pero éstos fueron una plaga mayor para ellos, ya que ahora no hay lobos marsupiales vivos y sí un considerable excedente de seres humanos.

Tampoco hubo, en Sudamérica, verdaderos perros ni felinos durante el largo período de aislamiento que estamos tratando, pero hubo sus equivalentes marsupiales, como en Australia. Probablemente el más espectacular fuera el *Thylacosmilus*, que se parecía al recién extinguido «tigre» de dientes de sable del Viejo Mundo, sólo que aumentado, si se entiende lo que quiero decir. Su boca abierta en forma de daga era aún más ancha, e imagino que más terrorífica. El nombre recuerda su afinidad superficial con el tigre de dientes de sable (*Smilodon*) y el lobo de Tasmania (*Thylacinus*), pero, en términos de antigüedad, es más remoto que los dos. Está ligeramente más cerca del *thylacine*, ya que ambos son marsupiales, pero ambos diseños han evolucionado por separado, a partir de grandes carnívoros en continentes distintos; con independencia entre sí y con respecto a los carnívoros placentarios, los verdaderos felinos y perros del Viejo Mundo.

Australia, Sudamérica y el Viejo Mundo ofrecen otros numerosos ejemplos de evolución múltiple convergente. Australia tiene un «topo» marsupial que, al menos superficialmente, casi no se distingue de los topos familiares de otros continentes, excepto porque tiene una bolsa, vive de la misma manera que ellos y tiene las mismas patas delanteras enormemente fortalecidas para cavar. Hay un ratón marsupial en Australia, aunque en este caso el parecido no sea tan cercano, ni viva de la misma manera. Comer hormigas (donde la palabra «hormigas» se considera por conveniencia que incluye a las termitas, otra convergencia, como veremos) es una «ocupación» desempeñada por gran variedad de mamíferos convergentes. Los comedores de hormigas pueden subdividirse según vivan en madrigueras, trepen a los árboles o correteen por el suelo. En Australia, como podríamos esperar, hay un comedor de hormigas marsupial. El llamado *Myrmecobius* tiene una trompa larga y delgada para hurgar en los hormigueros, y una lengua larga y pegajosa con la que recoge sus presas. Es un comedor de hormigas que vive en el suelo. Australia tiene también un comedor de hormigas que vive en madrigueras, el oso hormiguero espinoso. No es un marsupial, sino un miembro del grupo de mamíferos que ponen huevos, los monotremas, tan alejados de nosotros que los marsupiales, en comparación, serían nuestros primos carnales. El oso hormiguero espinoso tiene también una trompa larga y afilada, pero sus espinas le dan un parecido superficial mayor con un erizo que con un comedor de hormigas típico.

Sudamérica podría haber tenido un comedor de hormigas marsupial, en paralelo con su «tigre» marsupial de dientes de sable, pero el oficio de comedor de hormigas fue desempeñado, en principio, por los mamíferos placentarios. El comedor de hormigas más grande hoy en día es el *mirmecófago* (que, simplemente, significa comedor de hormigas, en griego), un gran comedor de hormigas que vive en el suelo, en Sudamérica y probablemente el mayor especialista del mundo en esta tarea. Como el marsupial australiano *Myrmecobius*, tiene una trompa, extremadamente larga y afilada en este caso, y una lengua larga y pegajosa. Sudamérica tiene también un pequeño comedor de hormigas que trepa a los árboles, un primo cercano del *mirmecófago* que parece una miniatura de una versión menos extrema de éste, y una tercera forma intermedia. Aunque son mamíferos placentarios, estos comedores de hormigas están muy lejos de cualquier animal placentario del Viejo Mundo. Pertenecen a una familia sudamericana única, que incluye también a los armadillos y los perezosos. Esta antigua familia placentaria coexistió con los marsupiales desde los primeros días del aislamiento del continente.

Los comedores de hormigas del Viejo Mundo incluyen varias especies de pangolines en África y Asia, que varían desde las formas que trepan a los árboles hasta las formas que excavan la tierra, y que parecen todos fircones con trompas puntiagudas. También se encuentra en África el extraño oso hormiguero, que está parcialmente especializado en excavar. Una característica propia de todos los comedores de hormigas, sean marsupiales, monotremas o placentarios, es que tienen un ritmo metabólico extremadamente bajo. El ritmo metabólico es el ritmo con el que arde su «fuego» químico, lo que se mide por su temperatura sanguínea. Existe la tendencia de que el ritmo metabólico de los mamíferos depende, en general, de su tamaño corporal. Los animales más pequeños tienen un ritmo metabólico más elevado, al igual que los motores de los coches pequeños giran con mayor ritmo que los de los coches grandes. Pero algunos animales tienen ritmos metabólicos muy elevados para su tamaño, y los comedores de hormigas, sean cuales fueren sus antepasados y afinidades, muestran unos ritmos metabólicos muy bajos para su tamaño. El motivo no está claro, pero es tan sorprendentemente convergente entre animales que no tienen nada en común, excepto su hábito de comer hormigas, que es casi seguro algo relacionado con este hábito.

Como hemos visto, las «hormigas» que devoran los comedores de hormigas no suelen ser verdaderas hormigas, sino termitas. Las termitas se conocen como «hormigas blancas», pero están más relacionadas con las cucarachas que con las verdaderas hormigas, que, a su vez, están relacionadas con las abejas y las avispas. Las termitas se parecen a las hormigas porque han adoptado los mismos hábitos de una forma convergente. La misma gama de hábitos, debería decir, porque hay muchas ramificaciones diferentes en la ocupación hormiga/termita, y tanto las hormigas como las termitas han adoptado muchas de ellas. Y como sucede tan a menudo con la evolución convergente, las diferencias son tan reveladoras como las semejanzas.

Tanto las hormigas como las termitas viven en grandes colonias, formadas principalmente por obreras estériles, sin alas, dedicadas a la producción eficaz de castas aladas reproductoras, que marchan volando para fundar nuevas colonias. Una diferencia interesante es que las hormigas obreras son todas hembras estériles, mientras que en las termitas hay machos y hembras estériles. Ambos tipos de colonias, hormigas y termitas, tienen una (o varias) «reinas», a veces (tanto en las hormigas como en las termitas) grotescamente grandes. En ambos grupos, las obreras pueden incluir castas de especialistas, tales como los soldados. Éstos son máquinas tan especializadas para la lucha (especialmente sus enormes mandíbulas en el caso de las hormigas, y su «torreta de tiro» para la guerra química, en el caso de las termitas), que son incapaces de alimentarse por sí mismos y tienen que ser alimentados por las obreras que no son soldados. Determinadas especies de hormigas muestran un gran paralelismo con determinadas especies de termitas. Por ejemplo, el hábito de cultivar hongos se ha originado de forma independiente en hormigas (en el Nuevo Mundo) y termitas (en África). Las hormigas (o termitas) se alimentan de un material procedente de plantas que no digieren ellas mismas sino que lo transforman en un compuesto sobre el que cultivan los hongos. Lo que comen son los hongos. Éstos, en ambos casos, no crecen en ningún lugar más que en los nidos de las hormigas o de las termitas. El hábito de cultivar hongos también ha sido descubierto independiente y convergentemente (más de una vez) por varias especies de escarabajos.

También hay convergencias interesantes entre las hormigas. Aunque la mayoría de sus colonias viven una existencia asentadas en un nido fijo, hay una variedad que se gana la vida vagando como enormes ejércitos de saqueo. Se denomina hábito legionario. Todas las hormigas caminan para buscar su alimento, pero la mayoría de las especies vuelven a un nido fijo con su botín, mientras la reina y las crías se quedan allí. La clave del hábito legionario errante, por otra parte, radica en que los ejércitos llevan a las crías y a la reina con ellos. Los huevos y las larvas son transportados entre las mandíbulas de las obreras. En África el hábito legionario ha sido desarrollado por las llamadas hormigas conductoras. En América central y en Sudamérica los «ejércitos de hormigas» son muy similares a las hormigas conductoras, en hábitos y apariencia. Pero no tienen una relación estrecha determinada. Las características del oficio de «ejército» han evolucionado de manera independiente y de forma convergente.

Tanto las hormigas conductoras como los ejércitos de hormigas tienen unas colonias muy numerosas, hasta un millón en los ejércitos de hormigas, y hasta 20 millones en el caso de las hormigas conductoras. Ambos tipos tienen fases nómadas alternando con fases «estacionarias» en campamentos o «bivouacs», relativamente estables. Los ejércitos de hormigas y las hormigas conductoras o, mejor dicho, sus colonias tomadas en conjunto como una unidad semejante a una ameba, son depredadores crueles y terribles de sus respectivas junglas. Hacen pedazos a cualquier animal que encuentren en su camino, y han adquirido una aureola mística de terror en sus regiones respectivas. Los habitantes de ciertas partes de Sudamérica tienen fama de aban-

donar sus pueblos cuando se acerca un gran ejército de hormigas, y volver cuando las legiones se han marchado, después de haber limpiado cada cucaracha, araña y escorpión incluso de los techos de paja. Recuerdo que siendo niño, en África, tenía más miedo de las hormigas conductoras que de los leones o de los cocodrilos. Merece la pena poner esta formidable reputación en perspectiva, citando las palabras de Edward O. Wilson, la primera autoridad mundial en hormigas y autor del libro *Sociobiología*:

> En respuesta a una pregunta que se me formula con frecuencia sobre las hormigas, puedo decir: No, las hormigas conductoras no son realmente el terror de la jungla. Aunque una colonia de hormigas conductoras es un «animal» que pesa más de 20 kg, posee del orden de 20 millones de bocas y aguijones y es seguramente la creación más formidable del mundo de los insectos, no iguala las historias espeluznantes que se cuentan sobre ellas. Después de todo, la multitud de hormigas sólo puede cubrir alrededor de un metro de terreno cada tres minutos. Cualquier ratón de campo, sin mencionar un hombre o un elefante, puede apartarse y contemplar placenteramente todo este frenesí entre las raíces de las plantas, este objeto menos amenazante que extraño y maravilloso, la culminación de una historia evolutiva tan diferente a la de los mamíferos como pueda concebirse en este mundo.

En Panamá, ya de adulto, me he apartado y he contemplado el equivalente de las hormigas conductoras en el Nuevo Mundo que tanto había temido en mi infancia en África, fluyendo a mi alrededor como un río crujiente, y puedo testificar la singularidad y la sorpresa. Hora tras hora, las legiones marcharon, caminando tanto sobre los cuerpos de otros como sobre el suelo, mientras yo esperaba a la reina. Finalmente llegó, y fue la suya una imponente presencia. Imposible ver su cuerpo. Apareció como una ola aislada de frenéticas obreras en movimiento, una bola de hormigas en ebullición peristáltica con las patas unidas. Ella estaba en algún lugar en medio de aquella esfera que bullía de obreras, mientras a su alrededor las filas masificadas de soldados miraban hacia fuera de una manera amenazadora con sus mandíbulas boquiabiertas, todos preparados para matar y morir en defensa de la reina. Perdonad mi curiosidad: hurgué la masa de hormigas obreras con un largo bastón, en un intento vano de hacer salir fuera a la reina. En el mismo instante, 20 soldados hundieron sus enormes pinzas en mi bastón, posiblemente para no dejarlo nunca más, mientras docenas de ellos ascendían por el bastón haciéndome soltarlo con presteza.

No llegué a vislumbrar a la reina, pero estaba en algún lugar

de aquella masa en ebullición, el banco de datos central, el depósito del DNA patrón de toda la colonia. Aquellos soldados, con sus bocas abiertas, estaban preparados para morir por la reina, no porque amasen a su madre, ni porque hubiesen sido instruidos en los ideales del patriotismo, sino porque sus cerebros y sus mandíbulas fueron construidos por genes impresos a partir del patrón transportado en la propia reina. Se comportaban como bravos soldados porque habían heredado los genes de una larga línea de reinas antepasadas, cuyas vidas, y cuyos genes, fueron salvados por soldados tan bravos como ellos mismos. Mis soldados habían heredado los mismos genes de la reina actual que los que habían heredado aquellos viejos soldados de las reinas ancestrales. Estaban guardando las copias magistrales de todas las múltiples instrucciones que les hacían estar de guardia. Estaban guardando la sabiduría de sus antepasados, el Arca de la Alianza. Estas extrañas afirmaciones se simplificarán en el próximo capítulo.

Sentí entonces extrañeza y asombro, no sin una mezcla de recuerdos de miedos medio olvidados, transfigurados y acrecentados por una comprensión madura, que no tenía cuando era niño en África, de la finalidad que tenía toda aquella representación. Acrecentados también por el conocimiento de que esta historia de las legiones había alcanzado la misma culminación evolutiva no una vez sino dos. Éstas no eran las hormigas conductoras de mis pesadillas infantiles, por muy similares que parecieran, sino primos remotos del Nuevo Mundo. Estaban haciendo lo mismo que las hormigas conductoras, y por las mismas razones. Era ya de noche cuando volví a casa, transformado de nuevo en un muchacho atemorizado, pero alegre dentro de un nuevo mundo de comprensión que había sustituido a aquellos oscuros temores africanos.

5. EL PODER Y LOS ARCHIVOS

Afuera cae una lluvia de DNA. En la orilla del canal de Oxford, en la parte baja de mi jardín, hay un gran sauce, que está lanzando al aire semillas de aspecto algodonoso. No hay una corriente continua de aire, y las semillas van a la deriva desde el árbol en todas direcciones. En el canal, arriba y abajo, tan lejos como pueden llegar mis binoculares, el agua está blanca por los copos de aspecto algodonoso, y se puede asegurar que también han alfombrado el suelo en otras direcciones, en un radio similar. La semilla algodonosa está formada, en su mayor parte, por celulosa, que impide el crecimiento de la diminuta cápsula que contiene el DNA, la información genética. El contenido de DNA es una pequeña proporción del total; así pues, ¿por qué digo que cae una lluvia de DNA, en lugar de celulosa? La respuesta es porque el DNA es lo que importa. La pelusa de celulosa, aunque abulta más, es sólo un paracaídas que se desecha. La secuencia en su totalidad, el algodón, las candelillas que cuelgan, el árbol, y todo lo demás, está orientada hacia una sola cosa, la diseminación del DNA por la campiña. No es simplemente cualquier DNA, sino uno cuyos caracteres codificados descifran las instrucciones para que crezcan sauces que, a su vez, esparzan una nueva generación de semillas algodonosas. Estos copos algodonosos son, literalmente, instrucciones diseminadas para hacerse a sí mismos. Están allí porque sus antepasados tuvieron éxito haciendo lo mismo. Afuera cae una lluvia de instrucciones; una lluvia de programas; una lluvia de algoritmos, para hacer crecer árboles, para diseminar copos algodonosos. No es una metáfora, es la pura verdad. No podría ser más cierto si estuviesen cayendo diskettes de ordenador.

Es simple y cierto, pero no hace mucho tiempo que lo hemos comprendido. Hace algunos años, si se preguntaba a cualquier

biólogo qué tenían de especial las cosas vivas, en contraposición con las cosas inertes, habría hablado de una sustancia especial llamada protoplasma. El protoplasma no era como cualquier otra sustancia, era vital, vibrante, palpitante, pulsátil, «irritable» (una manera académica de decir que respondía a los estímulos). Si cortáramos un cuerpo vivo en trozos pequeños, llegaríamos hasta las partículas de protoplasma puro. Durante el último siglo, un duplicado real del profesor Challenger, de Arthur Conan Doyle, pensaba que la «globigerina que fluía suavemente» del fondo del mar era puro protoplasma. Cuando yo iba a la escuela, los viejos autores de textos escribían todavía sobre el protoplasma aunque, para entonces, realmente deberían tener más conocimientos. Hoy en día ya no se oye esta palabra. Está tan muerta como el flogisto y el éter universal. No hay nada especial sobre la sustancia de la que están hechas las cosas vivas. Las cosas vivas son colecciones de moléculas, como el resto de las cosas.

Lo que tienen de especial estas moléculas es que están reunidas con unos patrones mucho más complejos que las cosas no vivas, y esta forma de ensamblarse se hace siguiendo unos programas, un conjunto de instrucciones sobre el propio desarrollo, que los organismos llevan en su interior. Puede ser que vibren y latan y pulsen con «irritabilidad», y resplandezcan con un calor «vivo», pero todas estas propiedades emergen de manera incidental. Lo que yace en el corazón de cada cosa viva no es un fuego, ni un aliento de calor, ni una «chispa de vida». Es información, palabras, instrucciones. Si se quiere una metáfora, no hay que pensar en fuego, ni chispas ni aliento. En su lugar, hay que pensar en mil millones de caracteres discontinuos, digitales, grabados en unas tablas de cristal. Si se quiere comprender la vida, no hay que pensar en geles o légamos que vibren o latan, sino en información tecnológica. A esto apuntaba en el capítulo anterior, cuando me refería a la reina como el banco central de datos.

La infraestructura para una tecnología avanzada de la información consiste en un medio de almacenamiento con un gran número de memorias. Cada localización debe ser capaz de adoptar un número discontinuo de estados. Esto es cierto, en el caso de la información tecnológica *digital* que domina hoy nuestro mundo artificial. Hay otra clase de información tecnológica alternativa, la información *analógica*. La información de un disco gramofónico ordinario es analógica. Está almacenada en un surco ondulado. La información en un disco de láser (llamado disco compacto, lo que es una lástima, porque el nombre no es informativo, y además se pronuncia mal poniendo el acento en la primera sílaba [compact disk]) es digital, y está almacenada en

una serie de protuberancias diminutas, cada una de las cuales adopta o no ese estado definitivamente. Esta es la característica de un sistema digital: sus elementos básicos están definitivamente en un estado o en otro, sin cantidades intermedias y sin intermedios ni compromisos.

La información tecnológica de los genes es digital. Este hecho lo descubrió Gregor Mendel, en el siglo XIX, aunque él no lo haya expresado así. Mendel demostró que nosotros no mezclamos la herencia de nuestros dos padres. Recibimos nuestra herencia en unidades discretas. En lo que se refiere a cada unidad, la heredamos o no. En realidad, como ha señalado R. A. Fisher, uno de los padres fundadores de lo que se denomina ahora neodarwinismo, la existencia de unidades hereditarias ha estado siempre a la vista, cada vez que pensamos en el sexo. Heredamos nuestros atributos de un padre masculino y otro femenino, pero cada uno de nosotros es masculino o femenino, no hermafrodita. Cada nuevo recién nacido tiene aproximadamente las mismas *probabilidades* de heredar la masculinidad que la feminidad, pero hereda sólo una de ellas, y no combina las dos. Ahora sabemos que lo mismo es cierto del resto de nuestras unidades hereditarias. No se mezclan, sino que permanecen discontinuas y separadas, mientras se barajan y vuelven a barajarse en el transcurso de las generaciones. Sin embargo, con frecuencia hay una poderosa apariencia de mezcla en los efectos que la genética tiene sobre los cuerpos. Si una persona alta se empareja con una persona baja, o una persona negra con una blanca, sus descendientes suelen tener una apariencia intermedia. Pero la apariencia de mezcla sólo se aplica a los efectos sobre los cuerpos, y se debe a la suma de los pequeños efectos de un gran número de unidades. Las mismas unidades que permanecen separadas y discontinuas cuando llega el momento de ser transmitidas a la siguiente generación.

La distinción entre herencia por fusión y herencia por transmisión de unidades ha tenido una gran importancia en la historia de las ideas sobre la evolución. En tiempos de Darwin, todo el mundo (excepto Mendel, quien, oculto en su monasterio, fue desgraciadamente ignorado hasta después de su muerte) pensaba que la herencia consistía en una fusión. Un ingeniero escocés, llamado Fleeming Jenkins, apuntó que el hecho de que la herencia consistiese en una mezcla (como se pensaba entonces) descartaba la selección natural como teoría de la evolución. Ernst Mayr observa con bastante dureza que el artículo de Jenkins «se basaba en todos los prejuicios y errores habituales de los científicos físicos». Sin embargo, Darwin se preocupó bastante por el argumento de Jenkins. Este argumento estaba descrito con mucho

más colorido en la parábola del hombre blanco que naufraga en una isla habitada por «negros».

> Concedámosle todas las ventajas que podamos concebir que un blanco posee sobre los nativos; concedámosle que, en la lucha por la existencia, sus posibilidades de vivir una vida larga sean muy superiores a las de los jefes nativos; a pesar de todas estas concesiones, no llegaremos a la conclusión de que, después de un número limitado o ilimitado de generaciones, los habitantes de la isla sean blancos. Nuestro heroico náufrago probablemente llegaría a ser rey; mataría un gran número de negros en su lucha por la existencia; tendría un gran número de mujeres e hijos, mientras muchos de sus súbditos vivirían y morirían solteros... Nuestras cualidades de blancos ayudarían a que se conservase hasta una edad avanzada, y aun así no sería suficiente un número de generaciones determinado para que se volviesen blancos los descendientes de sus súbditos... En la primera generación habría algunas docenas de jóvenes mulatos inteligentes, con una inteligencia media superior a la de los negros. Podríamos esperar que el trono estuviese ocupado durante algunas generaciones por un rey de un color más o menos amarillento; pero ¿podría alguien creer que toda la isla adquiriera gradualmente una población blanca o incluso una población amarilla, o que los isleños adquirieran la energía, coraje, ingenuidad, paciencia, autocontrol, resistencia, y otras cualidades en virtud de las cuales nuestro héroe hubiese matado tantos de sus antepasados, y engendrado tantos hijos; serían estas cualidades, de hecho, las seleccionadas, en la lucha por la existencia, si es que ésta puede seleccionar algo?

No nos distraigamos con las afirmaciones racistas sobre la superioridad de los blancos. Éstas eran tan incuestionables en tiempos de Jenkins y Darwin, como lo son nuestras afirmaciones sobre *los derechos humanos, la dignidad humana* y el concepto sagrado de la vida *humana* hoy día. Podemos volver a escribir el argumento de Jenkins con una analogía más neutral. Si se mezclan pintura blanca y pintura negra, lo que obtendremos es pintura gris. Si se mezcla pintura gris con pintura gris, no se podrá reconstruir el blanco o el negro originales. La mezcla de pinturas no está muy lejos de la visión premendeliana de la herencia, e incluso hoy día la cultura popular expresa con frecuencia la herencia en términos de «mezcla de sangres». El argumento de Jenkins es un argumento sobre la desaparición. Bajo este supuesto, según transcurren las generaciones, la variación estaría destinada a desaparecer. Prevalecería una uniformidad cada vez mayor. Eventualmente, no quedaría ninguna variación sobre la que pudiese actuar la selección natural.

Creíble como debió de haber sonado este argumento, no es

sólo un argumento contra la selección natural. ¡Más bien va contra hechos que no escapan a la propia herencia! No es completamente *cierto* que la variación vaya desapareciendo en el transcurso de las generaciones. La gente *no* es más similar entre sí hoy día, que lo era en tiempos de sus abuelos. La variación se ha mantenido. Hay una mezcla de variaciones sobre las que se puede actuar. Así lo señalaron desde un punto de vista matemático, W. Weinberg en 1908, y el excéntrico matemático G. H. Hardy, quien de forma incidental, como está registrado en el libro de apuestas de sus (y mis) colegas, aceptó una vez una apuesta de un colega de «pagarle medio penique hasta su muerte, a que el sol saldría mañana». Pero fue necesario que R. A. Fisher y sus colegas, los fundadores de la genética de poblaciones moderna, desarrollaran una respuesta completa a Fleeming Jenkins en términos de la teoría mendeliana de *unidades* genéticas. En su momento, fue una ironía porque, como veremos en el capítulo 11, los principales seguidores de Mendel, a comienzos del siglo XX, se consideraban antidarwinistas. Fisher y sus colegas mostraron que la selección darwinista tenía sentido, y el problema de Jenkins fue elegantemente resuelto; lo que cambiaba en la evolución era la *relativa frecuencia* de unas unidades hereditarias discontinuas, o genes, cada una de las cuales estaba, o no, en un cuerpo determinado. El darwinismo después de Fisher se llama neodarwinismo. Su naturaleza digital no es un hecho incidental que resulte cierto en el caso de la información genética. La digitalidad es probablemente una condición previa necesaria para que funcione el darwinismo.

En nuestra tecnología electrónica, las localizaciones discontinuas digitales tienen sólo dos estados, representados de manera convencional como 0 y 1, aunque podrían imaginarse como alto y bajo, activo e inactivo, arriba y abajo: lo único que importa es que tienen que ser distintos uno del otro, y que el patrón que refleja sus estados pueda ser «leído» de forma que ejerza una influencia sobre algo. La tecnología electrónica utiliza distintos medios físicos para almacenar unos y ceros, incluyendo discos magnéticos, cintas magnéticas, tarjetas y cintas perforadas, y «chips» integrados, con muchas unidades pequeñas semiconductoras en su interior.

El principal medio de almacenamiento de las semillas de sauce, hormigas y otras células vivas no es electrónico sino químico. Aprovecha el hecho de que ciertas clases de moléculas son capaces de «polimerizarse», es decir, de unirse formando largas cadenas de longitud infinita. Hay muchas clases de polímeros diferentes. Por ejemplo, el «polietileno» está formado por largas cadenas de una pequeña molécula denominada etileno,

etileno polimerizado. El almidón y la celulosa son azúcares polimerizados. Algunos polímeros, en lugar de ser cadenas uniformes de una molécula como el etileno, son cadenas de dos o más pequeñas moléculas diferentes. Tan pronto como se introduce esta heterogeneidad en una cadena de polímeros, la información tecnológica se convierte en una posibilidad teórica. Si hay dos clases de moléculas, podríamos imaginárnoslas como 1 y 0, respectivamente, y almacenar a continuación cualquier cantidad de información, de cualquier tipo, siempre que la cadena sea lo suficientemente larga. Los polímeros utilizados por las células vivas se llaman polinucleótidos. Hay dos clases principales, llamados DNA y RNA. Ambos son cadenas de pequeñas moléculas, llamadas nucleótidos. Ambos son cadenas heterogéneas, formadas por cuatro tipos distintos de nucleótidos. Aquí es, por supuesto, donde descansa la oportunidad de almacenamiento. En lugar de tener sólo dos estados 1 y 0, la tecnología de la información de las células vivas utiliza cuatro estados, que podemos representar de forma convencional como A, T, C y G. Hay poca diferencia, en principio, entre una tecnología informática binaria con dos estados, como la nuestra, y una tecnología informática con cuatro estados, como la de la célula viva.

Al final del capítulo 1 mencioné que una sola célula humana tiene suficiente capacidad de información como para almacenar la *Enciclopedia Británica*, los 30 volúmenes completos, más de tres o cuatro veces. Desconozco la cifra comparativa para una semilla de sauce o una hormiga, pero debe de ser de este asombroso orden. Hay suficiente capacidad de almacenamiento en el DNA de una sola semilla de lirio, o de un solo espermatozoide de salamandra para almacenar más de 60 veces la *Enciclopedia Británica*. Algunas especies de las llamadas injustamente amebas «primitivas» tienen tanta información en su DNA como 1 000 *Enciclopedias Británicas*.

Asombrosamente, parece ser que sólo se utiliza alrededor de un uno por ciento de la información genética localizada en una célula humana, por ejemplo: más o menos el equivalente a un volumen de la *Enciclopedia Británica*. Nadie sabe por qué está allí el 99 por ciento restante. En un libro anterior, sugerí que podía ser parasitario, descansando sobre los esfuerzos del uno por ciento restante, una teoría que ha sido recogida recientemente por los biólogos moleculares, bajo el nombre de «selfish DNA» (DNA egoísta). Una bacteria tiene una capacidad de información menor que la de una célula humana, alrededor de unas mil veces menor, y probablemente lo utiliza casi todo: hay poco espacio para parásitos. ¡En su DNA sólo cabría una copia del Nuevo Testamento!

Los ingenieros genéticos tienen ya la tecnología para escribir el Nuevo Testamento o alguna cosa más en el DNA de una bacteria. El «significado» de los símbolos en cualquier tecnología informática es arbitrario, y no hay razón por la que no pudiéramos asignar combinaciones, tripletes, del alfabeto de 4 letras del DNA, a las letras de nuestro alfabeto de 26 letras (habría suficientes para todas las letras mayúsculas y minúsculas y para 12 caracteres de puntuación). Claro que llevaría alrededor de 5 siglos humanos escribir el Nuevo Testamento en una bacteria, de forma que dudo que alguien esté interesado en el proyecto. Si se hiciese, el ritmo de reproducción de las bacterias es tal que podrían imprimirse 10 millones de copias del Nuevo Testamento en un solo día, el sueño de un misionero, si la gente pudiese leer el alfabeto del DNA pero, ¡ay!, los caracteres son tan pequeños que los 10 millones de copias podrían apilarse a un tiempo en la superficie de la cabeza de un alfiler.

La memoria electrónica de los ordenadores se clasifica de forma convencional en ROM y RAM. ROM quiere decir memoria que «sólo se lee» (Read Only Memory). Más estrictamente, es una memoria «que se escribe una vez y se lee muchas veces». El patrón de ceros y unos se «graba a fuego» durante la fabricación, de una vez y para siempre. Luego permanece sin cambios el tiempo que dure la memoria, pudiendo leerse la información cualquier número de veces. Otra memoria electrónica, llamada RAM, puede ser «escrita» (uno pronto se acostumbra a esta jerga tan poco elegante de los ordenadores) así como leída. Las RAM pueden, por tanto, hacer todo lo que hacen las ROM, y más. El significado de las letras RAM puede inducir a error, por lo que no lo mencionaré. Lo esencial sobre las RAM es que se puede incluir cualquier patrón de ceros y unos donde se quiera, tantas veces como se quiera. La mayor parte de la memoria de un ordenador es RAM. Según estoy escribiendo estas palabras, van directamente a la RAM, y el programa del procesador de textos que controla todo está también en la RAM, aunque teóricamente podría estar grabado en la ROM, y entonces no podría alterarse nunca. Las ROM se utilizan con un repertorio fijo de programas estándar, que se necesiten una y otra vez, y que no se pueden cambiar aunque se quisiera.

El DNA es una ROM. Puede ser leído millones de veces, pero sólo se escribe una vez: cuando se monta por primera vez durante el nacimiento de la célula en la que reside. El DNA de las células de cualquier individuo es «grabado a fuego» y no se altera nunca durante la vida del individuo, excepto rarísimos deterioros producidos al azar. Sin embargo, puede ser copiado. Se duplica cada vez que se divide una célula. El patrón de nucleótidos A, T, C y G se copia fielmente en el nuevo DNA de cada una de los tres billones de células que se forman cuando crece un niño. Cuando es concebido un nuevo individuo, se «graba a fuego» un patrón de datos, nuevo y único, en la ROM de su DNA, al que tiene que mantenerse fiel durante el resto de su vida. Este patrón se copia en todas sus células (excepto las células reproductoras, en las que sólo se copia una mitad del DNA de manera aleatoria, según veremos).

Toda la memoria de un ordenador, sea ROM o RAM, está *direccionada*. Esto significa que cada localización en la memoria está indicada, normalmente por un número, aunque esto sea un acuerdo convencional arbitrario. Es importante comprender la distinción entre la *dirección* y el *contenido* de una localización de memoria. Cada localización se conoce por su dirección. Por ejemplo, las dos primeras letras de este capítulo, «Af», están situadas en este momento en las localizaciones 6 446 y 6 447 de la RAM de mi ordenador, que tiene un total de 65 536. En otro momento, el contenido de estas dos localizaciones puede ser diferente. El contenido de una localización es la última cosa que ha sido escrita en esta localización. Cada localización en la ROM tiene también una dirección y un contenido. La diferencia estriba en que cada localización se mantendrá siempre unida a su contenido.

El DNA está ordenado a lo largo de unas fibras cromosómicas, como largas cintas de ordenador. Todo el DNA de cada una de nuestras células está direccionado igual que la ROM de un ordenador o, mejor dicho, que una cinta de ordenador. Los números o los nombres que utilizamos para identificar una dirección determinada son arbitrarios, de igual manera que lo son en la memoria de un ordenador. Lo que importa es que una localización concreta en mi DNA se corresponda exactamente con una localización concreta en otro DNA: es decir, que tengan exactamente la misma dirección. El *contenido* de la localización 321 762 de mi DNA puede ser, o no, el mismo que la localización 321 762 de otra persona. Pero la localización 321 762 está exactamente en la misma posición en mis células que en las de otra persona. «Posición» significa aquí posición a lo largo de un cromosoma determinado. No importa la posición física exacta del cromosoma en la célula. En realidad, flota en un líquido de forma que su posición física varía, pero cada localización está direccionada exactamente en términos de un orden lineal a lo largo de su longitud, de igual manera que cada localización está exactamente direccionada a lo largo de una cinta de ordenador, aunque la cinta esté esparcida por el suelo, en lugar de estar cuidadosamente enrollada. Todos nosotros, los seres humanos,

tenemos el mismo conjunto de *direcciones* en el DNA, pero no necesariamente el mismo *contenido* en estas direcciones. Esta es la razón principal por la que somos diferentes.

Otras especies no tienen el mismo conjunto de *direcciones*. Los chimpancés, por ejemplo, tienen 48 cromosomas frente a los 46 nuestros. Estrictamente hablando, no es posible comparar el contenido dirección por dirección, porque las direcciones no se corresponden entre sí debido a las barreras de especie. Sin embargo, las especies estrechamente relacionadas, como los chimpancés y los seres humanos, tienen trozos con contenidos contiguos en común tan grandes, que podemos identificarlos como básicamente iguales, aun cuando no podamos utilizar realmente el mismo sistema de direccionamiento en las dos especies. Lo que define una especie es que todos sus miembros tengan el mismo sistema de direccionamiento en su DNA. Con algunas pequeñas excepciones, todos los miembros de una especie tienen el mismo número de cromosomas, y cada localización a lo largo de un cromosoma tiene una equivalencia exacta con la misma posición del cromosoma correspondiente en todos los miembros de la especie; lo que puede diferir entre los miembros de una especie es el contenido de esas localizaciones.

Las diferencias de contenido en distintos individuos se producen de la manera siguiente, y aquí debo subrayar que estoy hablando de especies que se reproducen sexualmente como la nuestra. Nuestros espermatozoides y óvulos contienen 23 cromosomas cada uno. Cada localización direccionada en uno de mis espermatozoides se corresponde con una localización direccionada concreta en cada uno de mis espermatozoides restantes, y en cada uno de los óvulos (o espermatozoides) de otra persona. El resto de mis células contiene 46: un conjunto doble. La misma dirección se utiliza dos veces en cada célula. Cada célula contiene dos cromosomas 9, y dos versiones de la localización 7 230 a lo largo de este cromosoma. El contenido de las dos puede ser, o no, el mismo, así como puede ser, o no, el mismo en los demás miembros de la especie. Cuando se forma un espermatozoide con 23 cromosomas a partir de una célula somática con 46 cromosomas, recibe sólo una de las dos copias de cada localización direccionada. El contenido de cada espermatozoide es tratado de forma aleatoria. Lo mismo sucede en los óvulos. El resultado es que cada espermatozoide y cada óvulo producidos son únicos, en términos del *contenido* de sus localizaciones, aunque su sistema de direccionamiento sea idéntico en todos los miembros de la especie (con pequeñas excepciones, por las que no es necesario preocuparse). Cuando un espermatozoide fertiliza un óvulo, se completa el contenido de 46

cromosomas; y los 46 se duplican en todas las células del embrión en desarrollo.

He dicho que no puede escribirse en las ROM, excepto cuando se fabrican por primera vez, y que esto también es cierto del DNA de las células, excepto en algunos casos aislados en los que se producen errores aleatorios durante la duplicación. Pero hay un sentido en el que el banco de datos colectivo compuesto por las ROM de toda una especie puede ser escrito de una manera constructiva. La supervivencia no aleatoria y el éxito en la reproducción de los individuos «van escribiendo» instrucciones mejoradas para su supervivencia, de una manera efectiva, en la memoria genética colectiva de la especie, en el transcurso de las generaciones. Los cambios evolutivos consisten, en gran medida, en cambios en la proporción de copias que pueden estar contenidas en cada localización direccionada del DNA. Por supuesto, en un momento determinado, cada copia tiene que estar dentro del cuerpo de un individuo. Pero lo que importa durante la evolución son los cambios en la frecuencia de contenidos alternativos posibles dentro de cada dirección en las distintas *poblaciones*. El sistema de direccionamiento sigue siendo el mismo, pero el perfil estadístico del contenido de las localizaciones cambia con el paso de los siglos.

Muy raras veces cambia el sistema de direccionamiento. Los chimpancés tienen 24 pares de cromosomas y nosotros tenemos 23. Compartimos un antepasado común con el chimpancé, de forma que, en algún momento, debe de haber habido un cambio en el número de cromosomas de nuestros antepasados o en los del chimpancé. O nosotros perdimos un cromosoma (se unieron dos), o los chimpancés ganaron uno (uno se dividió). Debe de haber habido por lo menos un individuo que tuvo un número de cromosomas diferente del de sus padres. Ocasionalmente, se producen otros cambios en el sistema genético. Hay trozos enteros de código, que, como veremos, pueden ser copiados en cromosomas completamente diferentes. Lo sabemos porque se han encontrado largos segmentos de DNA, idénticos, dispersos en distintos cromosomas.

Cuando se ha leído la información de una localización concreta en la memoria de un ordenador, pueden suceder dos cosas. Que sólo se escriba en otro lugar, o que se derive alguna «acción». Ser escrito en algún otro lugar significa ser copiado. Ya hemos visto que el DNA puede ser copiado de una célula a otra nueva, y que se pueden copiar trozos de DNA de un individuo a otro, llámese su hijo. La «acción» es más compleja. En los ordenadores, un tipo de acción es la ejecución de un programa de instrucciones. En la ROM de mi ordenador, las localizacio-

nes con los números 64 489, 64 490 y 64 491, juntas, muestran un patrón con un contenido particular –de unos y ceros– que, cuando se interpretan como instrucciones, dan como resultado que el pequeño altavoz del ordenador emita un pitido. La combinación de bits es 10101101 00110000 11000000. No hay nada inherente en ella que pite o haga ruido. Nada que indique que va a tener este efecto sobre el altavoz. Ejerce su acción sólo por la forma en que está conectado del resto del ordenador. De igual manera, las combinaciones del código de cuatro letras del DNA ejercen efectos, por ejemplo, sobre el color de los ojos o sobre el comportamiento, pero sin que sean inherentes a las propias combinaciones del DNA. Ejercen estos efectos sólo como resultado de la manera en que se desarrolla el resto del embrión, que, a su vez, está influenciado por los efectos combinados de otras partes del DNA. Esta interacción entre genes será el tema principal del capítulo 7.

Antes de que puedan estar implicados en algún tipo de acción, los símbolos del código del DNA tienen que ser traducidos a otro medio. Primero se traducen a los símbolos correspondientes del RNA. El RNA tiene también un alfabeto de cuatro letras. A partir de aquí, se traducen a diferentes clases de polímeros, llamados polipéptidos o proteínas. Podrían denominarse poliaminoácidos, porque sus unidades básicas son aminoácidos. Hay 20 tipos de aminoácidos en las células vivas. Todas las proteínas biológicas son cadenas formadas por estos 20 bloques básicos. Aunque sean cadenas de aminoácidos, la mayoría no adoptan una forma larga y filamentosa. Cada uno se transforma en un complicado ovillo, cuya forma viene determinada por el orden en que se encuentran los aminoácidos. Por tanto, la forma de este ovillo no varía nunca para una secuencia de aminoácidos determinada. La secuencia, a su vez, viene determinada por los símbolos del código de un segmento de DNA (a través del RNA como intermediario). Existe, por tanto, la sensación de que la forma de enrollarse una proteína en tres dimensiones viene determinada por la secuencia de los símbolos del código de DNA en una dimensión.

El procedimiento de traducción incluye el célebre «código genético» de tres letras. Es un diccionario, en el que cada uno de los 64 ($4 \times 4 \times 4$) *tripletes* posibles de símbolos de DNA (o RNA) se traducen en uno de los 20 aminoácidos, o en un símbolo de «punto final». Hay tres símbolos de puntuación equivalentes al «punto final». Muchos de los aminoácidos están codificados por más de un triplete (como puede suponerse por el hecho de que hay 64 tripletes y sólo 20 aminoácidos). Todo el proceso de traducción desde el DNA ROM estrictamente secuencial hasta la estructura tridimensional meticulosamente invariable de las proteínas, es una proeza remarcable de tecnología informática digital. Los pasos siguientes a través de los cuales los genes ejercen su influencia sobre el cuerpo tienen una similitud menos obvia con los ordenadores.

Cada célula viva, incluso una bacteria, puede imaginarse como una gigantesca factoría química. Los patrones de DNA, o genes, ejercen sus efectos influenciando el curso de los hechos en esta factoría, a través de sus efectos sobre la estructura tridimensional de las moléculas de proteínas. La palabra gigantesca puede parecer sorprendente para una célula, más si recordamos que podemos acomodar 10 millones de bacterias en la superficie de la cabeza de un alfiler. Pero recordemos también que cada una de estas células es capaz de contener el Nuevo Testamento completo y, además, *es* gigantesca, si se mide el número de máquinas sofisticadas que contiene. Cada máquina es una gran molécula de proteína, ensamblada bajo la influencia de un segmento determinado de DNA. Las moléculas proteicas denominadas enzimas son máquinas, en el sentido de que cada una hace que se produzca una reacción química determinada. Cada tipo de proteína-máquina fabrica su producto químico particular. Para hacerlo, utiliza las materias primas que están flotando alrededor de la célula, y que son, probablemente, producto de otras proteínas-máquinas. Para tener una idea del tamaño de estas proteínas-máquinas, cada una está compuesta de 6 000 átomos, lo que es muy grande para estándares moleculares. Hay cerca de un millón de estas máquinas en una célula, y más de 2 000 tipos distintos, cada uno especializado en realizar una operación concreta dentro de la factoría química, la célula. Son los productos químicos característicos de estas enzimas los que dan a la célula su forma y comportamiento individuales.

Dado que todas las células somáticas contienen los mismos genes, puede parecer sorprendente que no sean todas iguales. El motivo es que se *leen* distintos subgrupos de genes en diferentes tipos de células, ignorándose el resto. En las células hepáticas, no se leen aquellas partes del DNA ROM específicamente relevantes para la formación de un riñón, y viceversa. La forma y el comportamiento de una célula depende de qué genes están siendo leídos y traducidos en productos proteicos, en su interior. Esto, a su vez, depende de las sustancias químicas que hay ya en la célula, lo que depende, en parte, de los genes que han sido leídos previamente, y en parte de los que han sido leídos en las células vecinas. Cuando una célula se divide en dos, las dos células hijas no son necesariamente iguales. En el óvulo original fertilizado, por ejemplo, ciertas sustancias químicas se

congregan en un polo de la célula, y otras en el polo opuesto. Cuando se divide una célula polarizada de esta manera, las dos células hijas reciben distintas asignaciones de sustancias químicas. Ello significa que se leerán diferentes genes en las dos células hijas, y se pondrá en marcha un tipo de divergencia. La forma final de todo el cuerpo, el tamaño de sus miembros, las conexiones cerebrales, la regulación de sus patrones de conducta, es todo consecuencia indirecta de las interacciones entre distintas clases de células, cuyas diferencias, a su vez, se originan a través de los diferentes genes que se han ido leyendo. Estos procesos divergentes se imaginan mejor como localmente autónomos, a semejanza del procedimiento «repetitivo» del capítulo 3, en lugar de estar coordinados dentro de algún gran diseño central.

La «acción» en el sentido utilizado en este capítulo es lo que describe un genetista cuando menciona el «efecto fenotípico» de un gen. El DNA ejerce sus efectos sobre el cuerpo, el color de los ojos, la forma de rizarse el cabello, la fuerza de una conducta agresiva y sobre otros miles de atributos, todos los cuales se denominan efectos fenotípicos. El DNA ejerce estos efectos localmente, en principio, después de ser leído por el RNA y traducido en cadenas proteicas, las cuales afectan a la forma y conducta de la célula. Ésta es una de las dos formas en las que puede leerse la información del patrón de DNA. La otra es que puede ser duplicado formándose una fibra nueva de DNA. Ésta es la duplicación que discutimos antes.

Existe una distinción fundamental entre estas dos vías de transmisión de información del DNA, vertical y horizontal. La información se transmite verticalmente al DNA de otras células (que fabrican otras células) que fabrican espermatozoides u óvulos. De aquí se transmite verticalmente a la siguiente generación y, de esta manera, a un número infinito de generaciones futuras. Llamaré a este DNA el «DNA archivo». Es potencialmente inmortal. La sucesión de células a través de las que viaja el DNA archivo se denomina línea germinal. Es el conjunto de células, dentro de un cuerpo, que constituyen los antepasados de los espermatozoides o de los óvulos y, por tanto, los antepasados de las futuras generaciones. La información del DNA se transmite también *lateral* u horizontalmente: al DNA de las células no germinales como las células hepáticas o las células de la piel; dentro de cada célula se transmite al RNA, y de ahí a las proteínas, produciendo distintos efectos sobre el desarrollo embrionario e indirectamente sobre la forma y conducta del adulto. La transmisión horizontal y vertical pueden imaginarse como los equivalentes de los dos subprogramas denominados DESARROLLO y REPRODUCCIÓN, del capítulo 3.

La selección natural es todo aquello que marca la diferencia en el éxito entre DNA rivales para conseguir ser transmitidos verticalmente en los archivos de la especie. «DNA rivales» significa contenidos alternativos de una dirección determinada en los cromosomas de la especie. Algunos genes tienen más éxito que otros genes rivales en cuanto a su permanencia en los archivos. Aunque sea la transmisión *vertical* a lo largo de los archivos de la especie lo que signifique el «éxito» en último extremo, el criterio de «éxito» es, normalmente, la *acción* que los genes tienen sobre los cuerpos, mediante su transmisión *lateral*. Es como en las bioformas del modelo del ordenador. Supongamos, por ejemplo, que los tigres tienen un gen determinado que, mediante su influencia lateral en las células de las mandíbulas, hace que los dientes sean un poco más afilados que aquellos que crecen bajo la influencia de un gen rival. Un tigre con dientes muy afilados puede matar a sus presas con más eficacia que uno normal; de aquí que tenga más descendencia; por tanto, transmitirá verticalmente más copias del gen que hace que los dientes sean más afilados. Transmitirá al mismo tiempo el resto de sus genes, por supuesto, pero sólo el gen específico para «dientes afilados» se encontrará, *por término medio*, en el cuerpo de los tigres con dientes afilados. El propio gen se beneficia, en términos de su transmisión vertical, de los efectos medios que tiene sobre toda una serie de cuerpos.

La función del DNA como archivo es espectacular. Su capacidad para preservar mensajes sobrepasa, con mucho, la de las lápidas de piedra. Las vacas y los guisantes (y, por supuesto, el resto de los seres vivos) tienen un gen casi idéntico, el denominado gen de la histona H4. El fragmento de DNA tiene 306 caracteres de longitud. No podemos decir que ocupe la misma dirección en todas las especies, porque no podemos comparar de manera significativa la localización de las direcciones entre especies. Pero lo que podemos decir es que tiene una longitud de 306 caracteres en las vacas, que son virtualmente idénticos a los 306 caracteres de los guisantes. Las vacas y los guisantes difieren entre sí en sólo dos de los 306 caracteres. No sabemos con exactitud cuánto hace que vivió su antepasado común, pero la evidencia de los fósiles sugiere que fue en algún punto hace 1 000 o 2 000 millones de años. Digamos que fue hace 1 500 millones de años. A lo largo de este inimaginable (para los seres humanos) período de tiempo, cada una de las dos descendencias que se ramificaron a partir de este remoto antepasado ha conservado 305 de los 306 caracteres (por término medio, podría ser también que una descendencia hubiese conservado los 306 y la otra sólo 304). Las letras grabadas en las lápidas funerarias no se pueden leer al cabo de unos cientos de años.

En cierto sentido, la conservación del texto de la histona H4 en el DNA es aún más impresionante porque, a diferencia de las lápidas de piedra, no es la misma estructura física la que dura y conserva el texto. El texto está siendo copiado y vuelto a copiar de una manera repetitiva en el transcurso de las generaciones como las escrituras hebreas eran copiadas ritualmente por los escribas, cada ochenta años, para prevenir su desgaste. Es difícil calcular cuántas veces ha sido copiado el texto de la histona H4 en la descendencia que ha conducido hasta las vacas, desde su antepasado común con los guisantes, pero es probable que sea del orden de los 20 000 millones de veces. Es también difícil encontrar una medida con la que comparar la conservación de más del 99 por ciento de la información en 20 000 millones de copias sucesivas. Podemos tratar de utilizar una versión del juego de pasar mensajes. Habría que imaginarse 20 000 millones de mecanógrafas sentadas en fila. La fila daría la vuelta a la Tierra 500 veces. La primera mecanógrafa escribiría una página de un documento y se la pasaría a su vecina. Ésta la copiaría y pasaría la copia a la siguiente. Ésta la copiaría otra vez y la pasaría a la siguiente, y así sucesivamente. El mensaje llegaría, eventualmente, al final de la fila, y lo leeríamos (o, más bien, lo haría nuestro biznieto número 12 000, asumiendo que todas las mecanógrafas tuviesen la velocidad media de una buena secretaria). ¿Qué fidelidad tendría la interpretación del mensaje original?

Para responder, tendríamos que realizar algunas hipótesis sobre la precisión de las mecanógrafas. Démosle la vuelta a la cuestión. ¿Cómo tendría que trabajar cada mecanógrafa, para igualar la hazaña del DNA? La respuesta es demasiado ridícula para expresarla. Por si tiene valor, cada mecanógrafa tendría que tener una frecuencia de errores de alrededor de uno en un billón; tendría que ser lo suficientemente precisa como para cometer un solo error mecanografiando la Biblia 250 000 veces de un tirón. Una buena secretaria en la vida real tiene una frecuencia de errores de alrededor de uno por página. Esto sería alrededor de quinientos millones de veces la frecuencia de errores del gen de la histona H4. Una hilera de secretarias en la vida real degradaría el 99 por ciento de las letras originales del texto, al llegar al miembro número 20 de la fila de 20 000 millones. Al llegar al miembro número 10 000 de la fila, sobreviviría menos del uno por ciento del texto original. El punto de degradación casi total se alcanzaría antes de que el 99,9995 por ciento de las mecanógrafas lo hubiesen visto.

Toda esta comparación ha sido un poco fraudulenta, pero en cierto aspecto interesante y reveladora. He dado la impresión de que lo que estábamos midiendo eran los errores al hacer la copia. Pero el documento de la histona H4 no sólo ha sido copiado, sino que ha estado sujeto a la selección natural. La histona es de vital importancia para la supervivencia. Se utiliza en la ordenación estructural de los cromosomas. Puede que se produjeran muchos más errores al *copiar* la histona H4, pero los organismos mutantes no sobrevivieron o, por lo menos, no se reprodujeron. Para establecer una comparación justa, tendríamos que asumir que cada mecanógrafa tiene un rifle montado en su silla, conectado de forma que si comete un error es fusilada al instante, y su sitio es ocupado por una mecanógrafa de reserva (los lectores escrupulosos quizá prefieran imaginarse un sillón eyector que catapulte a las malas mecanógrafas fuera de la fila, pero el rifle da un cuadro más realista de lo que es la selección natural).

Así pues, este método de medir la conservación del DNA, analizando el número de cambios que han ocurrido realmente durante el tiempo geológico, combina una fidelidad genuina en el proceso de duplicación y el efecto filtrante de la selección natural. Sólo vemos los descendientes de las mutaciones de DNA que han tenido éxito. Aquellas que les condujeron a la muerte es obvio que no están entre nosotros. ¿Podemos medir sobre el terreno la fidelidad actual de la realización de copias, antes de que la selección natural comience a actuar sobre una nueva generación de genes? Sí, es lo contrario de lo que se conoce como tasa de mutación, y puede medirse. La probabilidad de que una letra determinada esté mal copiada en una de las ocasiones en las que se copia es un poco más de una en mil millones. La diferencia entre esta tasa de mutación y la tasa menor, con la que este cambio ha sido incorporado en el gen de la histona durante la evolución, es una medida de la eficacia de la selección natural en la conservación de este antiguo documento.

La conservación de los genes de las histonas a lo largo de los eones es excepcional para los estándares genéticos. Otros genes cambian con una frecuencia más elevada, presumiblemente porque la selección natural es más tolerante con sus variaciones. Por ejemplo, los genes que codifican las proteínas conocidas como fibrinopéptidos cambian durante la evolución con una frecuencia que se aproxima a la tasa mutacional básica. Esto significa, probablemente, que los errores en los detalles de estas proteínas (que se producen durante la coagulación de la sangre) no son importantes para el organismo. Los genes de la hemoglobina muestran una frecuencia de cambios a medio camino entre las histonas y los fibrinopéptidos. Presumiblemente, la tolerancia de estos errores por parte de la selección natural es in-

termedia. La hemoglobina realiza un importante trabajo en la sangre, y sus detalles son también importantes; pero distintas variantes de la misma parece que realizan esta función igual de bien.

Aquí tenemos algo que parece un poco paradójico, hasta que ahondemos más sobre ello. Las moléculas que evolucionan con más lentitud, como las histonas, son las que han estado más sujetas a la selección natural. Los fibrinopéptidos son moléculas que evolucionan con mayor rapidez porque la selección natural las ignora casi por completo. Pueden evolucionar libremente con la frecuencia de la tasa mutacional. El motivo por el que puede parecer paradójico es que ponemos mucho énfasis en la selección natural como fuerza conductora de la evolución. Si no hubiese selección natural, por tanto, cabría esperar que no hubiese evolución. Por el contrario, la existencia de una «presión selectiva» intensa, y pedimos disculpas por pensarlo, cabría esperar que condujese a una evolución rápida. En lugar de esto, encontramos que la selección natural ejerce un efecto de freno sobre la evolución. La tasa de evolución basal, en ausencia de la selección natural, sería la máxima posible. Sería sinónimo de tasa de mutación.

No es realmente paradójico. Cuando pensemos más detenidamente en ello, veremos que no podría ser de otra manera. La evolución por selección natural no podría ser más rápida que la tasa de mutaciones, ya que la mutación es, en último extremo, el único camino por el que ingresan nuevas variaciones en la especie. Todo lo que puede hacer la selección natural es aceptar unas variaciones nuevas y rechazar otras. La tasa de mutación está ligada al hecho de situar un límite a la frecuencia con la que podría avanzar la evolución. De hecho, la mayor parte de la selección natural está más relacionada con la prevención de un cambio evolutivo que con su inducción. Esto no significa, me apresuro a insistir, que la selección natural sea un proceso puramente destructivo. Puede resultar también constructiva, en las formas que explicaré en el capítulo 7.

Con todo, la frecuencia de mutaciones es bastante baja. Ésta es otra forma de decir que, aun sin selección natural, la hazaña del código de DNA al preservar su archivo es bastante impresionante. Un cálculo conservador es que, en ausencia de la selección natural, el DNA se replica con tanta precisión que serían necesarias cinco millones de generaciones de replicaciones para copiar erróneamente el uno por ciento de los caracteres. Nuestras hipotéticas mecanógrafas estarían todavía sobrepasadas sin esperanza, por el DNA, aunque no hubiera selección natural. Para igualar al DNA sin selección natural, tendrían que ser

capaces, cada una de ellas, de escribir a máquina el Nuevo Testamento entero con un solo error. Esto es, cada una tendría que ser alrededor de 450 veces más precisa que una secretaria corriente. Esto es mucho menos que la cifra comparativa de quinientos millones, el factor de precisión del gen de la histona H4, *después de actuar la selección natural*, comparado con una secretaria típica; pero aun así es una cifra demasiado impresionante.

He sido injusto con las mecanógrafas. Presumí, en efecto, que no son capaces de observar sus errores y corregirlos. He imaginado una ausencia total de corrección de pruebas. En realidad, corrigen las pruebas, por supuesto. Mi hilera de miles de millones de mecanógrafas no dejaría, por tanto, que degenerase el mensaje original de la manera tan simple que he descrito. El mecanismo de duplicación del DNA realiza el mismo tipo de corrección de errores de forma automática. Si no lo hiciera, no conseguiría nada que pudiera compararse con la estupenda precisión que he descrito. El proceso de duplicación del DNA incorpora varias instrucciones de «corrección de pruebas». Esto es muy necesario, porque las letras del código del DNA no son estáticas, como los jeroglíficos grabados en granito. Por el contrario, las moléculas implicadas son tan pequeñas, recordemos todos aquellos Nuevos Testamentos dispuestos en la cabeza de un alfiler, que están bajo un constante ataque por parte de los choques habituales entre moléculas producidos por acción del calor. Hay un flujo constante, un intercambio de letras en el mensaje. Alrededor de 5 000 letras del DNA degeneran cada día en cada célula humana y son reemplazadas de inmediato por los mecanismos de reparación. Si los mecanismos de reparación no estuviesen allí trabajando sin cesar, el mensaje se disolvería de manera continua. La corrección de las pruebas de un texto recién copiado es sólo un caso especial del trabajo normal de reparación. Es, sobre todo, esta corrección de pruebas la responsable de la asombrosa precisión del DNA y su fidelidad para el almacenamiento de la información.

Hemos visto que las moléculas de DNA son el centro de una tecnología informática espectacular. Son capaces de empaquetar una inmensa cantidad de información digital, precisa, en un espacio muy pequeño; y son capaces de conservar esta información, sorprendentemente con pocos errores, algunos, durante un largo período de tiempo, que se mide en millones de años. ¿A dónde nos conducen estos hechos? Hacia una verdad esencial sobre la vida en la Tierra, la verdad a la que aludí en el párrafo de apertura sobre las semillas del sauce. Es decir, que los organismos vivos existen para beneficio del DNA, en lugar de ser lo contrario. Esto puede que no resulte obvio todavía,

pero espero poder persuadirles de ello. Los mensajes que contienen las moléculas de DNA lo son todo excepto eternos, cuando se ven frente a la escala de tiempo de la duración de las vidas individuales. La vida de los mensajes del DNA (con unas pocas mutaciones) se mide en unidades que oscilan entre millones de años y cientos de millones de años; en otras palabras, varían entre la duración de 10 000 vidas individuales y la de un billón de vidas individuales. Cada organismo debería contemplarse como un vehículo temporal, en el que los mensajes de DNA pasan una diminuta fracción de la duración del tiempo geológico.

¡El mundo está lleno de cosas que existen...! No lo discuto, pero ¿nos lleva esto a algún lugar? Las cosas existen porque han comenzado a existir recientemente, o porque poseen cualidades que han hecho que fuera poco probable que fuesen destruidas en el pasado. Las rocas no comienzan a existir con elevada frecuencia, pero una vez que existen son duras y duraderas. Si no fuera así, no serían rocas, serían arena. Por supuesto, algunas lo son, ¡y por esta razón tenemos playas! Las duraderas son las que persisten como rocas. Las gotas de rocío existen, no porque sean duraderas, sino porque han comenzado a existir y no han tenido todavía tiempo de evaporarse. Tenemos entonces dos clases de «valoración de la existencia»: las gotas de rocío, que puede resumirse como que «es muy probable que lleguen a existir pero no son muy duraderas», y las rocas, que «no es muy probable que lleguen a existir pero una vez allí perduran un largo período de tiempo». Las rocas tienen facilidad para perdurar y las gotas de rocío para «generarse». (He tratado de pensar otra palabra menos fea pero no se me ocurrió.)

El DNA tiene lo mejor de ambos mundos. Las propias moléculas de DNA, como entidades físicas, son como las gotas de rocío. Bajo condiciones adecuadas, comienzan a existir con una elevada frecuencia, pero ninguna permanece durante un largo período de tiempo, y son destruidas al cabo de unos pocos meses. No son duraderas como las rocas. Pero los *patrones* que llevan definidos en sus secuencias son tan duraderos como la roca más dura. Tienen lo que es necesario para existir durante millones de años y es por lo que están aquí ahora. La diferencia esencial con las gotas de rocío es que las gotas nuevas no son engendradas por las viejas. Indudablemente, las gotas de rocío se parecen entre sí pero no se parecen específicamente a las gotas de rocío «progenitoras». A diferencia de las moléculas de DNA, no forman descendencias y, por lo tanto, no pueden transmitir mensajes. Las gotas de rocío comienzan a existir por generación espontánea; los mensajes de DNA, por duplicación.

Verdades manifiestas como que «el mundo está lleno de cosas que tienen lo necesario para estar en él» son triviales, casi estúpidas, hasta que las aplicamos a un tipo especial de duración, en forma de descendencias de múltiples copias. Los mensajes de DNA tienen un tipo de duración diferente al de las rocas, y un tipo de generación diferente al de las gotas de rocío. Para las moléculas de DNA, «lo que es necesario para estar en el mundo» viene a tener un significado que es cualquier cosa excepto obvio y tautológico. «Lo que es necesario para estar en el mundo» incluye la capacidad de construir máquinas como tú y yo, las cosas más complejas del universo conocido. Veamos cómo puede ser así.

La razón fundamental radica en que las propiedades del DNA que hemos identificado resultan ser los ingredientes básicos necesarios para cualquier proceso de selección cumulativa. En nuestro modelo informatizado del capítulo 3, construimos deliberadamente los ingredientes básicos de la selección cumulativa. Si ésta tiene realmente lugar en el mundo, tuvieron que originarse algunas entidades cuyas propiedades constituyesen esos ingredientes básicos. Observemos, ahora, cuáles son esos ingredientes. Deberíamos recordar que estos mismos ingredientes, al menos en una forma rudimentaria, deben de haberse originado de una manera espontánea en la Tierra primitiva; de otra forma, la selección cumulativa y, por tanto, la vida, no habría comenzado nunca. No estamos hablando específicamente del DNA, sino de los ingredientes básicos necesarios para que se origine la vida en cualquier lugar del universo.

Cuando el profeta Ezequiel estaba en el valle de los huesos realizó un conjuro y los hizo juntarse. Realizó después otro conjuro e hizo que la carne y los tendones se situaran alrededor de ellos. Pero todavía no había aliento en ellos. Faltaba el ingrediente vital, la vida. Un planeta muerto tiene átomos, moléculas y grandes trozos de materia, chocando entre sí y encajándose de una manera aleatoria, de acuerdo con las leyes de la física. A veces, las leyes de la física hacen que los átomos y las moléculas se junten como los huesos secos de Ezequiel; otras veces hacen que se separen. Pueden formarse conjuntos de átomos bastante grandes, y pueden deshacerse y separarse otra vez. Pero sin que haya aliento en ellos.

Ezequiel llamó a los cuatro vientos para que pusieran un aliento de vida en los secos huesos. ¿Cuál es el ingrediente vital que debe tener un planeta muerto, como la Tierra primitiva, si quiere tener la posibilidad de llegar a estar vivo, como sucedió con nuestro planeta? No es el aliento, ni el viento, ni ninguna clase de elixir o poción. No es ninguna sustancia, sino una *pro-*

piedad, la propiedad de la autoduplicación. Éste es el ingrediente básico de la selección cumulativa. Tienen que haberse producido de algún modo, como consecuencia de las leyes ordinarias de la física, entidades *autoduplicables* o, como yo los llamaré, *duplicadores*. En la vida moderna, este papel está representado, casi enteramente, por las moléculas de DNA, pero cualquier cosa que pudiera hacer copias serviría. Podemos sospechar que los primeros duplicadores sobre la Tierra primitiva no fueron moléculas de DNA. No es probable que comenzara a existir una molécula de DNA totalmente acabada sin la ayuda de otras moléculas que normalmente existen sólo en las células vivas. Es probable que los primeros duplicadores fuesen más rudimentarios y simples que el DNA.

Los otros dos ingredientes necesarios se originan normalmente de forma automática a partir del primero, la autoduplicación. Tiene que haber errores ocasionales durante el proceso de autoduplicación; incluso el sistema del DNA comete errores muy ocasionalmente, y parece probable que los primeros duplicadores sobre la Tierra fuesen mucho más erráticos. Y, por lo menos, algunos de los duplicadores, debieron de tener cierto *poder* sobre su propio futuro. Esto último suena de una forma más siniestra de lo que es en realidad. Lo único que significa es que algunas propiedades de los duplicadores debieron de ejercer cierta influencia sobre su probabilidad de ser duplicados. Es probable que esto fuese, por lo menos en una forma rudimentaria, consecuencia inevitable del hecho básico de la propia autoduplicación.

Cada duplicador tiene, entonces, copias de sí mismo. Cada copia es igual que el original, y tiene sus mismas propiedades. Entre ellas está, por supuesto, la de hacer (a veces con errores) *más* copias de sí mismo. Así que cada duplicador es el «antepasado» potencial de una línea infinitamente larga de duplicadores descendientes, que se extienden hacia un futuro distante, y se ramifican para producir, en teoría, un número enorme de duplicadores descendientes. Cada copia nueva debe estar hecha de materias primas, bloques más pequeños que se encuentran entrechocando alrededor. Se presume que los duplicadores actúan como una especie de molde o templado. Los componentes más pequeños caen en el molde formándose un duplicado del mismo. El duplicado se libera luego y es capaz de actuar, a su vez, como molde. De aquí que tengamos, en teoría, una *población* creciente de duplicadores. La población no crece de manera indefinida, porque, eventualmente, el suministro de materias primas, los elementos más pequeños que caen en los moldes, llegan a limitar el crecimiento.

Introduzcamos ahora nuestro segundo ingrediente en el argumento. Algunas veces, la duplicación no es perfecta. Pueden ocurrir errores. Esta posibilidad no puede eliminarse nunca de un proceso de duplicación, aunque puede reducirse a límites muy bajos. Es lo que tratan de hacer todo el tiempo los fabricantes de aparatos de alta fidelidad y, como hemos visto, el proceso de duplicación del DNA es espectacularmente bueno corrigiendo errores. Pero la duplicación actual del DNA es un asunto de alta tecnología, con elaboradas técnicas de corrección de errores, que se han ido perfeccionando a lo largo de muchas generaciones de selección cumulativa. Los primeros duplicadores, en comparación, debían de ser artilugios relativamente toscos, de baja fidelidad.

Volvamos a nuestra población de duplicadores, y veamos cuál sería el efecto de una duplicación errática. Obviamente, en lugar de tener una población uniforme de duplicadores idénticos, tendríamos una población mixta. Es probable que muchos productos de esta duplicación errática perdiesen la propiedad de la autoduplicación que tenían sus «progenitores». Pero unos pocos la retendrían, diferenciándose al mismo tiempo de su progenitor en algún otro aspecto. Así que tendríamos copias de errores que estarían siendo duplicados en la población.

Cuando se lea la palabra «error», hay que desterrar de la mente toda asociación peyorativa. Significa la existencia de un error desde el punto de vista de la duplicación de alta fidelidad. Es posible que un error dé como resultado una mejora. Me atrevería a decir que muchos de los exquisitos platos que existen en la actualidad han sido creados porque un cocinero cometió un error mientras trataba de seguir una receta. Hasta donde puedo afirmar haber tenido alguna idea científica original, éstas han sido a veces una mala interpretación o una mala lectura de las ideas de otra gente. Volviendo a nuestros duplicadores primitivos, mientras muchos errores en la duplicación dan como resultado una disminución en su rendimiento, o una pérdida absoluta de esta propiedad, unos pocos podrían haber aumentado su *eficacia* en la autoduplicación, en comparación con el duplicador que les dio origen.

¿Qué significa «eficacia»? En último extremo, una mayor eficiencia en la autoduplicación, pero ¿qué podría representar en la práctica? Esta cuestión introduce nuestro tercer ingrediente. Me refiero a él como «poder», y veremos por qué. Cuando tratamos la duplicación como un proceso de moldeo, vimos que el último paso del proceso es la liberación de la nueva copia del viejo molde. El tiempo que precisa puede estar influenciado por una propiedad que llamaré «adherencia» al viejo molde. Supongamos que en nuestra población de duplicadores, variable a causa

de viejos errores en las duplicaciones de sus «antepasados», unas variedades son más adherentes que otras. En las variedades muy adherentes, las nuevas copias se aferrarían un tiempo medio de más de una hora antes de liberarse finalmente y permitir que el proceso pueda volver a empezar. Las variedades menos adherentes soltarían las nuevas copias dentro de una fracción de segundo, a partir de su formación. ¿Cuál de estas dos variedades llegaría a predominar en la población de duplicadores? No hay duda sobre la respuesta. Si ésta es la única propiedad en la que difieren las dos variedades, la más adherente está destinada a ser mucho menos numerosa en la población. La variedad no adherente está soltando copias a un ritmo miles de veces mayor que el de la variedad de copias adherentes. Las variedades de adherencia intermedia tendrán frecuencias intermedias de autopropagación. Habrá así una «tendencia evolutiva» hacia la reducción de esta adherencia.

Algo parecido a este tipo de selección natural elemental ha sido duplicado en el tubo de ensayo. Hay un virus, llamado Q-beta, que vive como parásito de la bacteria intestinal *Escherichia coli*. El virus Q-beta no tiene DNA pero contiene o consiste en una sola fibra de una molécula relacionada, el RNA. El RNA tiene la capacidad de duplicarse de manera similar al DNA.

En una célula normal, las moléculas de proteínas se agrupan según las especificaciones de los planes del RNA. Las moléculas de RNA son copias de trabajo de los planes impresos a partir del DNA patrón mantenido en los preciosos archivos de la célula. En teoría, es posible construir una máquina especial, una molécula proteica como el resto de las máquinas celulares, que imprima copias de RNA a partir de otras copias. Esta máquina se conoce como molécula de RNA-replicasa. La célula bacteriana no encuentra, normalmente, ninguna utilidad para estas máquinas, y no construye ninguna. Pero, al ser una molécula de proteína como cualquier otra, las versátiles máquinas que fabrican las proteínas de la célula bacteriana pueden volver a hacerla fácilmente, de igual manera que las herramientas de una fábrica de coches pueden ser reconvertidas rápidamente en tiempos de guerra para hacer municiones: todo lo que se necesita es que se le introduzca los negativos adecuados. Aquí es donde el virus entra en escena.

El plan de trabajo del virus es un plan RNA. Superficialmente, no se distingue de ningún otro negativo de trabajo de los RNA que están flotando alrededor, impresos por el DNA patrón de la bacteria. Pero si se lee la letra pequeña del RNA viral se encontrará escrito algo diabólico. Son las indicaciones de un plan para hacer RNA-replicasa: para hacer máquinas que harán más

copias de estos mismos planes, que a su vez harán más máquinas que harán más copias de los planes, que harán más...

Así que la fábrica es asaltada por estos negativos interesados en sí mismos. En cierto sentido, estaba pidiendo serlo. Si se llena una fábrica con máquinas tan sofisticadas que puedan hacer cualquier cosa que cualquier negativo les diga que hagan, no resulta sorprendente que más pronto o más tarde se origine un negativo que les ordene que hagan copias de sí mismas. La fábrica se llenará con más y más falsas máquinas, que lanzarán hacia fuera falsos negativos para hacer más máquinas que harán más copias de sí mismas. Finalmente, la desafortunada bacteria estallará liberando millones de virus que infectarán nuevas bacterias. Ya hemos hablado bastante sobre el ciclo vital normal del virus en la naturaleza.

He llamado RNA-replicasa y RNA a una máquina y un negativo, respectivamente. Así son, en cierto sentido (que será explicado sobre otra base en un capítulo posterior), pero son también moléculas, y los químicos pueden purificarlas, embotellarlas y almacenarlas en una estantería. Lo hicieron Sol Spiegelman y sus colaboradores, en Norteamérica, en los años sesenta. Pusieron después las dos moléculas en la misma solución, y sucedió una cosa fascinante. En el tubo de ensayo, las moléculas de RNA actuaron como negativos para la síntesis de copias de sí mismas, ayudadas por la presencia de la RNA-replicasa. Las herramientas y los negativos fueron extraídos y almacenados por separado, refrigerados. Tan pronto como se volvieron a juntar en una solución acuosa, en unión de unas pequeñas moléculas necesarias como materia prima, volvieron a realizar sus viejos trucos, aunque ya no estaban dentro de una célula viva sino en el interior de un tubo de ensayo.

Desde aquí no hay sino un pequeño paso hasta la selección natural y la evolución en el laboratorio. Es sólo una versión química de las bioformas del ordenador. El experimento consiste, básicamente, en preparar una larga fila de tubos de ensayo conteniendo cada uno de ellos una solución de RNA-replicasa, y la materia prima, pequeñas moléculas que puedan ser utilizadas para la síntesis del RNA. Cada tubo de ensayo contiene las herramientas y la materia prima, pero hasta ese momento permanece inactivo, sin hacer nada, porque le falta el negativo sobre el que trabajar. Ahora, depositemos una diminuta cantidad de RNA en el primer tubo de ensayo. El aparato de la replicasa comienza a trabajar en seguida fabricando muchas copias de las moléculas del RNA recientemente introducido, que se dispersan a través del tubo de ensayo. Extraigamos una gota de la solución del primer tubo y pongámosla en el segundo tubo de en-

sayo. El proceso se repite en el segundo tubo de ensayo, extrayéndose otra gota que se utiliza para sembrar el tercer tubo, y así sucesivamente.

Ocasionalmente, debido a la producción de errores aleatorios durante la duplicación, se origina de forma espontánea una molécula de RNA mutante, ligeramente diferente. Si, por cualquier razón, la nueva variedad es competitivamente superior, en el sentido de, quizá, su baja «adherencia», se replicará con más rapidez, o de una manera más eficiente, y se diseminará a través del tubo de ensayo en el que se originó, sobrepasando en número al tipo que le dio origen. Cuando se extraiga una gota de la solución de este tubo de ensayo para sembrar el siguiente, será la nueva variedad mutante la que realice la siembra. Si examinamos los RNA en una larga sucesión de tubos de ensayo, veremos algo que sólo puede llamarse un cambio evolutivo. Variedades competitivamente superiores de RNA producidas al final de varias «generaciones» de tubos de ensayo que pueden embotellarse y etiquetarse para su posterior utilización. Una variedad, por ejemplo, la denominada V2, se replica con mucha más rapidez que el RNA Q-beta normal, tal vez porque es más pequeña. A diferencia del RNA Q-beta, no tiene que «preocuparse» por incluir los planes para hacer la replicasa. Los científicos se la suministran gratis. El RNA V2 fue utilizado por Leslie Orgel y sus colegas, en California, como punto de partida para un interesante experimento en el que le impusieron un medio ambiente «hostil».

Añadieron a sus tubos de ensayo un veneno llamado bromuro de etidio, que inhibe la síntesis de RNA: estropea las herramientas. Orgel y sus colaboradores empezaron con una solución débil del veneno. Al principio, disminuyó el ritmo de síntesis, pero después de evolucionar a través de nueve «generaciones» de transferencias en los tubos de ensayo, se seleccionó una estirpe nueva de RNA resistente al veneno. El ritmo de síntesis de RNA era comparable al del RNA V2 normal en ausencia del veneno. Orgel y sus colegas duplicaron, entonces, la concentración del veneno. De nuevo, decayó el ritmo de síntesis del RNA pero después de otras 10 transferencias de tubos de ensayo, más o menos, evolucionó una estirpe de RNA que era inmune incluso a esta concentración de veneno. Se duplicó otra vez la concentración del veneno. De esta manera, por duplicaciones sucesivas, consiguieron que evolucionase una estirpe de RNA que podía autoduplicarse en un medio con una elevada concentración de bromuro de etidio, diez veces superior a la que inhibió el RNA V2 ancestral original. El nuevo RNA resistente se denominó V40. La evolución del V40 desde el V2 precisó alrededor de 100 «generaciones» de transferencias de tubo de ensayo (aunque es cierto que transcurrieron muchas más generaciones de replicaciones de RNA entre cada transferencia de tubos).

Orgel hizo también experimentos en los que no facilitó ninguna enzima. Encontró que en estas condiciones las moléculas de RNA pueden duplicarse espontáneamente, aunque con mucha lentitud. Parece que necesitan alguna otra sustancia catalizadora, como el cinc. Esto es importante porque, en los primeros días de la vida, cuando se originaron los duplicadores, no podemos suponer que hubiese enzimas para ayudarles a replicarse. Aunque, probablemente, sí había cinc.

El experimento complementario se llevó a cabo hace una década en el laboratorio de la influyente escuela alemana que trabaja sobre el origen de la vida, bajo la dirección de Manfred Eigen. Estos científicos pusieron la replicasa y los bloques para construir RNA en un tubo de ensayo, pero *no* sembraron la solución con RNA. A pesar de todo, evolucionó *espontáneamente* en el tubo una gran molécula de un RNA peculiar, y la misma molécula volvió a evolucionar una y otra vez en experimentos ulteriores independientes. Una cuidadosa comprobación demostró que no había posibilidad de infección con moléculas de RNA. Es un resultado extraordinario, si se considera la improbabilidad estadística de que se origine una misma molécula dos veces de forma espontánea. Es mucho más improbable que escribir espontáneamente PIENSO QUE ES COMO UNA COMADREJA. Como la frase de nuestro modelo informático, la molécula de RNA favorecida fue construida mediante una evolución gradual, *cumulativa.*

La variedad de RNA producida una y otra vez en estos experimentos tenía el mismo tamaño y estructura que las moléculas producidas por Sol Spiegelman. Pero mientras que Spiegelman las había hecho evolucionar por «degeneración», a partir de un RNA más grande, el del virus Q-beta, que existe en la naturaleza, las del grupo de Eigen se habían construido a sí mismas, prácticamente a partir de la nada. Esta fórmula está bien adaptada a un medio ambiente compuesto por tubos de ensayo a los que se añade replicasa ya preparada. Por consiguiente, se llega a un mismo punto mediante una selección cumulativa que parte de dos orígenes muy diferentes. Las moléculas de RNA Q-beta más grandes están menos adaptadas al ambiente de los tubos de ensayo pero mejor adaptadas al medio ambiente que suministran las células de *E. coli.*

Experimentos como éstos nos ayudan a apreciar la naturaleza automática y no deliberada de la selección natural. Las «máquinas» de replicasa no «saben» por qué hacen moléculas de

RNA: lo que hacen es sólo un producto secundario de su configuración. Y las propias moléculas de RNA no siguen una estrategia para conseguir ser duplicadas. Incluso, si pudieran pensar, no existe una razón obvia por la que una entidad pensante debiera estar motivada a hacer copias de sí misma. Si yo supiera cómo hacer copias de mí mismo, no estoy seguro de que diera una mayor prioridad a este proyecto en relación con el resto de cosas que quiero hacer: ¿por qué debería hacerlo? Pero la motivación es irrelevante para las moléculas. Resulta que la estructura del RNA viral es tal que hace que la maquinaria celular produzca masivamente copias de sí mismo. Y si cualquier entidad, en cualquier lugar del universo, tuviese la propiedad de ser eficiente haciendo más copias de sí misma, llegaría a haber más y más copias de esta entidad. Además, como se formarían linajes de un manera automática y, ocasionalmente, se copiarían con errores, las versiones posteriores mostrarían una tendencia a ser mejores haciendo copias de sí mismas que las anteriores, debido a la potencia del proceso de selección cumulativa. Todo es simple y automático. Es tan previsible que resulta casi inevitable.

Una molécula de RNA «que tenga éxito» en un tubo de ensayo lo tendrá a causa de alguna propiedad directa, intrínseca, algo análogo a la «adhesividad» de mi hipotético ejemplo. Pero las propiedades como la «adhesividad» son bastante aburridas. Son propiedades elementales del propio duplicador, propiedades que tienen un efecto directo sobre su probabilidad de ser duplicado. ¿Qué pasa si el duplicador tiene algún efecto sobre algo más, que afecte a algo más, que... eventualmente, afecte de manera indirecta a la probabilidad de que el duplicador sea duplicado? Puede verse que, aunque existiesen largas cadenas causales como ésta, todavía se mantendría la verdad fundamental. Los duplicadores que tuviesen lo necesario para ser duplicados llegarían a predominar en el mundo, *no importa lo larga e indirecta que fuese* la cadena de eslabones causales que influenciase su probabilidad de ser duplicados. Y, por la misma razón, el mundo se llenaría de eslabones de esta cadena causal. Vamos a ver estos eslabones y a maravillarnos ante ellos.

Los vemos todo el tiempo en los organismos modernos. Son los ojos, la piel, los huesos, los dedos, el cerebro y los instintos. Estos elementos son las herramientas para la duplicación del DNA. Están producidos por él, en el sentido de que las diferencias en los ojos, huesos, instintos, etc., están producidas por diferencias en el DNA. Ejercen una influencia sobre la duplicación del DNA que las produjo, en el sentido de que afectan a la supervivencia y reproducción de los cuerpos, que contienen el mismo DNA, y cuyo destino es, por tanto, compartido por el

DNA. Así, el propio DNA ejerce una influencia sobre su propia duplicación, a través de los atributos de los cuerpos. Puede decirse que el DNA ejerce influencia sobre su propio futuro, y los cuerpos, sus órganos y los patrones de conducta son sus instrumentos.

Cuando hablamos de poder, estamos hablando de los resultados de los duplicadores que afectan a su propio futuro, no importa lo indirectos que puedan ser. Tampoco importa cuántos eslabones haya en la cadena entre causa y efecto. Si la causa es una entidad autoduplicativa, el efecto, aunque sea muy distante e indirecto, podría estar sujeto a la selección natural. Resumiré esta idea general contando una historia peculiar sobre los castores. Los detalles son hipotéticos, pero no pueden estar lejos de la verdad. Aunque nadie haya investigado el desarrollo de las conexiones cerebrales en el castor, esta clase de investigaciones se han hecho en otros animales, como los gusanos. Tomo prestadas sus conclusiones y las aplico a los castores, porque los castores son más interesantes y congenian mejor con más gente que los gusanos.

Un gen mutante en un castor es sólo un cambio en una letra de un texto de mil millones de letras; un cambio en un gen determinado G. Según va creciendo el joven castor, el cambio se copia, junto con el resto de las letras del texto, en todas sus células. En muchas de ellas no se lee el gen G; se leen otros genes relevantes para su funcionamiento. G se lee, sin embargo, en algunas células durante el desarrollo del cerebro. Se lee y se transcribe a copias de RNA. Las copias de trabajo del RNA flotan en el interior de las células, y, eventualmente, algunas se encuentran con máquinas de hacer proteínas llamadas ribosomas. Las máquinas leen los planes de trabajo del RNA, y originan nuevas moléculas de proteínas siguiendo sus especificaciones. Las moléculas de proteínas se pliegan de una manera concreta, determinada por la secuencia de sus aminoácidos, que a su vez está gobernada por la secuencia del código de DNA para el gen G. Cuando el gen G se muta, el cambio constituye una diferencia crucial para la secuencia de aminoácidos especificada normalmente por el gen G y, en consecuencia, también para la forma de plegarse la molécula proteica.

Las moléculas proteicas ligeramente alteradas son producidas masivamente por las máquinas que fabrican proteínas en las células del cerebro en desarrollo. Estas moléculas actúan, a su vez, como enzimas, máquinas que fabrican otros compuestos en la célula, los productos de los genes. Los productos del gen G encuentran su camino hacia la membrana que rodea la célula, y se imbrican en los procesos mediante los cuales la célula esta-

blece conexiones con otras células. Debido a la ligera alteración en los planes originales del DNA, cambia el ritmo de producción de algunos de los compuestos de esta membrana. Esto cambia la manera en que ciertas células del cerebro en desarrollo se conectan entre sí. Se ha producido una alteración sutil en el diagrama de conexiones de una parte determinada del cerebro del castor, consecuencia indirecta, realmente muy lejana, de un cambio en el texto del DNA.

Esta parte concreta del cerebro del castor, debido a su posición en el diagrama global de conexiones, está implicada en su comportamiento durante la construcción de las presas. Por supuesto, hay grandes partes del cerebro implicadas siempre que el castor construye una presa pero, cuando la mutación G afecta esta parte concreta del diagrama de conexiones cerebrales, el cambio tiene un efecto específico sobre la conducta. Hace que el castor mantenga su cabeza más alta en el agua mientras nada con un tronco entre sus mandíbulas. Más alta que un castor sin esta mutación. Esto influye en que sea menos probable que el barro, adherido al tronco, se elimine durante el viaje. Lo cual aumenta la adhesividad del tronco, lo que a su vez significa que cuando el castor lo empuje contra la presa es más probable que permanezca allí. Esto se aplica a todos los troncos colocados por cualquier castor que tenga esta mutación particular. El aumento de la adhesividad de los troncos es consecuencia, de nuevo una consecuencia muy indirecta, de una alteración en el texto del DNA.

El aumento de la adherencia de los troncos hace que el dique sea una estructura más sólida, con menos probabilidades de romperse. Esto, a su vez, incrementa el tamaño del lago creado por el dique, lo que hace que el alojamiento en el centro del lago sea más seguro contra los depredadores. Lo cual tiende a aumentar el número de descendientes criados por el castor. Si contemplamos el conjunto de la población de castores, aquellos que posean el gen mutado criarán, por término medio, más descendientes que aquellos que no tienen el gen mutado. Los descendientes heredarán las copias del archivo con el mismo gen alterado que sus padres. Por consiguiente, en la población, esta forma del gen llegará a ser más numerosa en el transcurso de las generaciones. Eventualmente, se transformará en la norma, y no merecerá ya el título de «mutante». Los diques de los castores habrán mejorado, en general, un grado más.

El hecho de que esta historia sea hipotética, y de que los detalles puedan ser erróneos, es irrelevante. El dique de los castores evolucionó por selección natural y, por tanto, lo que ocurrió no pudo ser muy diferente, excepto en cuanto a detalles

prácticos, de la historia que he contado. Las implicaciones generales de esta visión de la vida están explicadas y elaboradas en mi libro *The Extended Phenotype* (El fenotipo desplegado), y no repetiré aquí los argumentos. Se observará que en esta hipotética historia no hay menos de 11 eslabones en la cadena causal que une el gen alterado con una mejora en la supervivencia. En la vida real podría haber incluso más. Cada uno de estos eslabones, bien sea un efecto sobre la bioquímica en el interior de la célula, un efecto posterior sobre la conexión de las células del cerebro entre sí, un efecto incluso posterior sobre el comportamiento, o un efecto final sobre el tamaño del lago, se contempla como *producido* por un cambio en el DNA. No importa que haya 111 eslabones. Cualquier efecto que ejerza un cambio en un gen sobre su propia probabilidad de replicación es un juego justo para la selección natural. Es todo perfectamente simple, y deliciosamente automático y sin premeditación. Algo así es casi inevitable, una vez que los ingredientes fundamentales de la selección cumulativa, replicación, error y poder, comenzaron a existir. Pero ¿cómo sucedió? ¿Cómo empezó su existencia sobre la Tierra, antes de que apareciera la vida? Veremos cómo puede contestarse esta difícil pregunta en el próximo capítulo.

6. ORÍGENES Y MILAGROS

Azar, suerte, coincidencia, milagro. Uno de los principales tópicos de este capítulo son los milagros y lo que entendemos por ellos. Mi tesis será que los sucesos que llamamos normalmente milagros no son sobrenaturales, sino parte de un espectro más o menos poco probable de sucesos naturales. En otras palabras, que si se produce un milagro en alguna ocasión, sería un tremendo golpe de suerte. Los sucesos no se clasifican de una manera definida en sucesos naturales *versus* milagros.

Algunos sucesos podrían ser demasiado improbables para ser contemplados, pero no podemos saberlo hasta que hayamos hecho los cálculos. Y para hacerlos, necesitamos saber de cuánto *tiempo* disponemos o, en términos más generales, de cuántas *oportunidades* disponemos para que se produzca el suceso. Si suponemos un tiempo infinito, o unas oportunidades infinitas, cualquier cosa es posible. Las grandes cifras facilitadas por la astronomía, y los largos períodos de tiempo característicos de la geología se combinan para tornar patas arriba nuestras estimaciones diarias de lo que podemos esperar y lo que es milagroso. Llegaré a este punto utilizando un ejemplo concreto de lo que constituye el otro tema principal de este capítulo. El problema de cómo se originó la vida en la Tierra. Para aclarar este punto, me centraré de una manera arbitraria en una teoría concreta sobre el origen de la vida, aunque cualquier teoría moderna serviría para este propósito.

Podemos aceptar una cierta intervención del azar en nuestras explicaciones, no demasiada. La cuestión es *¿cuánta?* La inmensidad del tiempo geológico nos da derecho a postular más coincidencias improbables de las que nos permitiría un jurado; aun así, hay límites. La selección cumulativa es la clave de todas nuestras explicaciones modernas sobre la vida. Encadena una

serie de sucesos aceptablemente oportunos (mutaciones al azar) en una secuencia ordenada, de forma que el producto final de la misma transmite la ilusión de haber tenido, por supuesto, mucha suerte, de ser demasiado improbable como para haberse originado sólo por azar, aun suponiendo un intervalo de tiempo millones de veces más largo que la edad actual del universo. La selección cumulativa es la clave, pero tuvo que tener un comienzo, y no nos escapamos a la necesidad de postular un suceso causal en una sola etapa en el origen de la propia selección cumulativa.

Y este primer paso vital fue difícil porque, en su interior, descansa lo que parece ser una paradoja. El proceso de duplicación que conocemos necesita una complicada maquinaria para su funcionamiento. En presencia de la «herramienta» de la replicasa, los fragmentos de RNA evolucionan repetida y convergentemente hacia un mismo punto final, cuya «probabilidad» parece extremadamente pequeña, hasta que se refleja el poder de la selección cumulativa. Pero tenemos que ayudar a ponerla en marcha. No arrancará hasta que le facilitemos un catalizador, similar a la «herramienta» de la replicasa del capítulo anterior. Y este catalizador, según parece, es poco probable que llegue a existir de forma espontánea, excepto bajo la dirección de otras moléculas de RNA. Las moléculas de DNA se duplican en la complicada maquinaria de la célula, y las palabras escritas se duplican en las máquinas Xerox, pero no parecen ser capaces de una duplicación espontánea en ausencia de una maquinaria de apoyo. Una máquina Xerox es capaz de copiar sus propios negativos, pero no es capaz de comenzar a existir espontáneamente. Las bioformas se duplican en un ambiente facilitado por un programa de ordenador escrito adecuadamente, pero no pueden escribir su propio programa o construir un ordenador que lo ponga en funcionamiento. La teoría del relojero ciego es extremadamente potente, suponiendo que se nos permita asumir la existencia de la duplicación y, de aquí, la de la selección cumulativa. Pero si la duplicación necesita una maquinaria compleja, y el único camino que conocemos para que ésta llegue a existir es, en último extremo, la selección cumulativa, tenemos un problema.

Ciertamente, la maquinaria celular moderna, el aparato para la duplicación del DNA y la síntesis de proteínas, tiene todas las características de una maquinaria muy evolucionada, con un diseño especial. Hemos visto su asombroso funcionamiento como mecanismo de precisión para el almacenamiento de datos. A su nivel de ultraminiaturización, tiene el mismo orden de elaboración y complejidad de diseño que el ojo humano a un nivel

mayor. Todos los que han pensado sobre el tema están de acuerdo en que un aparato tan complejo como el ojo humano no pudo comenzar a existir, casi seguro, mediante una selección en una sola etapa. Desafortunadamente, lo mismo parece cierto, por lo menos de algunas partes del aparato de la maquinaria celular por medio del cual el DNA se autoduplica, y esto se aplica no sólo a las células de las criaturas evolucionadas como nosotros y las amebas, sino también a las criaturas relativamente más primitivas como las bacterias y las algas azules.

Así pues, la selección cumulativa puede fabricar complejidad, en tanto que la selección en una sola etapa no puede. Pero la selección cumulativa no puede funcionar a menos que haya una maquinaria mínima para realizar la duplicación y un duplicador con poder, y la única maquinaria que conocemos parece demasiado compleja como para haber comenzado a existir por otros medios que no sean muchas generaciones de selección cumulativa. Algunas personas consideran esta cuestión como un defecto fundamental en el conjunto de la teoría del relojero ciego. Lo ven como la prueba definitiva de que debe de haber habido originalmente un diseñador, no un relojero *ciego* sino un relojero sobrenatural, con una visión de futuro. Puede ser, arguyen, que el Creador no controle la sucesión de los sucesos evolutivos día a día; puede que no ideara el tigre y el cordero, puede que no creara los árboles, pero *compuso* la maquinaria original de la duplicación y dio poder al duplicador, la maquinaria original del DNA y las proteínas que hicieron posible la selección cumulativa y, por tanto, la evolución.

Este es un argumento endeble y, obviamente, se anula a sí mismo. La complejidad organizada es algo con lo que estamos teniendo problemas a la hora de explicarla. Una vez se nos permite *postular* su existencia, aunque sólo sea la complejidad organizada de la máquina replicadora del DNA/proteína, es relativamente fácil invocarla como generadora de una complejidad organizada aún mayor. Esto es, por supuesto, de lo que trata la mayor parte de este libro. Pero cualquier Dios capaz de diseñar algo tan complejo como la maquinaria duplicadora del DNA/proteína, de una forma tan inteligente, debe de haber sido al menos tan complejo y organizado como la propia máquina. Mucho más, si le suponemos, *además*, capaz de realizar funciones tan avanzadas como escuchar las plegarias y perdonar los pecados. Explicar el origen de la máquina del DNA/proteína invocando un Diseñador sobrenatural es no explicar nada, ya que deja sin explicación el origen del Diseñador. Hay que terminar diciendo algo como que «Dios estuvo siempre presente», y si uno se permite este tipo de salida fácil, podría decir también

que «el DNA estuvo siempre presente», o que «la Vida estuvo siempre presente», y acabar con el problema.

Cuanto más nos alejamos de los milagros, de las grandes improbabilidades, de las coincidencias fantásticas, de los grandes sucesos fortuitos, y cuanto más concienzudamente dividamos estos grandes sucesos en una serie cumulativa de pequeños sucesos fortuitos, más convencerán nuestras explicaciones a las mentes racionales. Pero en este capítulo nos estamos preguntando la dimensión de lo improbable, o lo *milagroso* que podemos postular sobre un suceso único. ¿Cuál es el mayor suceso aislado producido por pura coincidencia, por pura suerte, sin ninguna otra influencia, que podemos incluir en nuestras teorías y decir que tenemos todavía una explicación satisfactoria sobre la vida? Para que un mono escriba por casualidad «Pienso que es como una comadreja», se necesita mucha suerte, pero es todavía mensurable. Calculamos que las probabilidades son de alrededor de 10 000 millones de millones de millones de millones de millones de millones (10^{40}) contra 1. Nadie puede comprender o imaginar un número tan grande, por lo que pensamos en este grado de improbabilidad como sinónimo de imposible. Pero aunque no podamos comprender estos niveles de improbabilidad, no deberíamos huir aterrorizados. El número 10^{40} puede ser muy grande pero podemos escribirlo, y utilizarlo en nuestros cálculos. Existen números aún más grandes: 10^{46}, por ejemplo, no es simplemente más grande. Hay que sumar 10^{40} un millón de veces para obtener 10^{46}. ¿Qué pasaría si pudiésemos reunir de alguna forma una cuadrilla de 10^{46} monos cada uno con sus máquina de escribir? Porque, casi seguro que uno de ellos escribiría «Pienso que es como una comadreja», y otro escribiría, casi con certeza «Pienso, luego existo». El problema es, por supuesto, que no podríamos poner juntos tantos monos. Aunque toda la materia del universo se transformase en carne de mono, todavía no tendríamos suficientes monos. El milagro de que un mono escriba «Pienso que es como una comadreja» es demasiado grande cuantitativamente, *mensurablemente*, como para que lo admitamos en nuestras teorías sobre lo que ocurre en la realidad. Pero no podíamos saber esto hasta que nos sentamos e hicimos los cálculos.

Así pues, algunos niveles de suerte, no sólo son demasiado grandes para nuestras pequeñas imaginaciones humanas, sino también para nuestros concienzudos cálculos sobre el origen de la vida. Pero, repitamos la pregunta, ¿qué proporción de suerte, qué cantidad de milagro podemos postular? No escapemos a esta pregunta sólo porque hay grandes cifras implicadas. Es una cuestión perfectamente válida, y, por lo menos, podríamos escribir lo que necesitamos saber para calcular la respuesta.

Tenemos aquí una reflexión fascinante. La respuesta a nuestra pregunta —hasta dónde podemos postular una intervención del azar— depende de si nuestro planeta es el único que tiene vida, o si la vida abunda alrededor del universo. La única cosa que sabemos con certeza, es que la vida se ha originado una vez, aquí, en este planeta. Pero no tenemos idea de si hay vida en algún otro lugar del universo. Es posible que no la haya. Algunas personas han calculado que debe de haber vida en algún otro lugar, sobre la base siguiente (no apuntaré la falacia hasta el final): hay probablemente unos 10^{20} (esto es, 100 trillones) planetas, más o menos apropiados, en el universo. Sabemos que la vida se ha originado aquí, de manera que no puede ser *todo* tan improbable. Por lo tanto, es casi ineludible que algunos entre todos estos 100 trillones de planetas tengan vida.

El fallo del argumento descansa en la inferencia de que, debido a que *la vida se ha originado aquí*, no puede ser demasiado improbable. Se observará que contiene implícita la hipótesis de que cualquier cosa que suceda en la Tierra es probable que haya ocurrido en cualquier otra parte del universo, y esto resume la cuestión. En otras palabras, esa clase de argumento estadístico, de que debe de haber vida en cualquier lugar del universo porque hay vida aquí, da por sentada la tesis que se está tratando de probar. Ello no significa que la conclusión de que existe vida en el resto del universo sea necesariamente errónea. Mi opinión es que probablemente sea cierta. Sólo quiero resaltar que el argumento concreto que condujo a dicha conclusión no constituye un argumento después de todo. Es sólo una hipótesis.

Tomemos en consideración, por afán de discusión, la hipótesis alternativa de que la vida se originó sólo una vez, y que fue aquí en la Tierra. Es tentador oponerse a esta hipótesis sobre una base puramente emocional porque, ¿no hay algo terriblemente medieval en ello? ¿No recuerda los tiempos en los que la Iglesia enseñaba que nuestra Tierra era el centro del universo y las estrellas sólo pequeños puntos de luz, puestos en el cielo para nuestro disfrute (o, incluso, una presunción más absurda, que las estrellas se salen de su camino para ejercer influencias astrológicas sobre nuestras pequeñas vidas)? ¿Cuánto engreimiento al asumir que, de todos los trillones de planetas del universo, nuestro pequeño y remoto mundo, en nuestra pequeña y remota sección de un sistema solar, en nuestra pequeña y remota sección de una galaxia, hubiese sido escogido por la vida? Porque, ¿por qué motivo debería haber sido *nuestro* planeta?

Estoy arrepentido de verdad, porque agradezco de corazón

que hayamos escapado de la estrechez mental de la iglesia medieval y, por otra parte, desprecio a los astrólogos modernos, pero temo que la retórica sobre lo remoto en el párrafo anterior sea vana. Es enteramente posible que nuestro remoto planeta sea literalmente el único en el que se haya originado la vida en alguna ocasión. Lo importante es que si *hubiera* un solo planeta en el que se hubiese originado la vida, entonces *tendría* que haber sido el nuestro, por el motivo excelente de que «nosotros» ¡estamos aquí discutiendo la cuestión! Si el origen de la vida es un suceso tan improbable que sólo tuvo lugar en un planeta del universo, entonces nuestro planeta tiene que ser ese planeta. Así pues, no podemos utilizar el hecho de que hay vida en la Tierra para concluir que la vida debe de ser lo suficientemente probable como para haberse originado en otros planetas. Tal argumento sería circular. Deberíamos tener algunos argumentos independientes sobre lo fácil o difícil que resulta el que se origine vida en un planeta, antes de poder incluso empezar a contestar la pregunta de cuántos planetas tienen vida en el universo.

Pero ésta no es la cuestión con la que empezamos. Nuestra pregunta era, ¿en qué proporción podemos asumir que interviene el azar en una teoría sobre el origen de la vida en la Tierra? Dije que la respuesta dependía de si la vida se había originado sólo una vez o muchas veces. Comencemos asignando un número a la probabilidad, no importa lo pequeña que ésta sea, de que la vida pueda originarse en un planeta de un tipo determinado, designado al azar. Llamaremos a este número la probabilidad de generación espontánea, o PGE. Al PGE es adonde deberíamos llegar cuando nos sentamos en nuestro laboratorio con los manuales de química, o hacemos saltar chispas a través de mezclas de gases atmosféricos idóneos, y calculamos las probabilidades de que nazcan espontáneamente moléculas duplicadoras y comiencen a existir en una atmósfera típica de un planeta. Supongamos que nuestra mejor hipótesis sobre el PGE fuese un número muy pequeño, digamos, uno en mil millones. Ésta es, obviamente, una probabilidad tan pequeña que no tenemos la más ligera esperanza de duplicar un suceso tan fortuito, tan milagroso como el origen de la vida en nuestros experimentos de laboratorio. Con todo, si asumimos, como tenemos perfecto derecho a hacerlo a causa del argumento, que la vida se ha originado sólo una vez en el universo, se deduce que *podríamos* postular la intervención de una gran cantidad de suerte en la teoría, porque hay demasiados planetas en el universo donde *podría* haberse originado la vida. Si, como sugiere alguna estimación, hay 100 trillones de planetas, ésta sería 100 millones de

veces mayor incluso que el PGE tan bajo que postulamos. Para finalizar con este argumento, la máxima intervención del azar que podríamos asumir, antes de poder rechazar una teoría concreta sobre el origen de la vida, sería una probabilidad de uno en *N*, donde *N* es el número de planetas apropiados que hay en el universo. Hay muchas cosas ocultas en la palabra «apropiado», pero pongamos un límite de 1 en 100 trillones para describir la máxima intervención del azar que nos permitiría asumir este argumento.

Hay que pensar qué significa esto. Vayamos a ver a un químico y digámosle: saca tus manuales y tu calculadora; afila tu lápiz y tu ingenio; llena tu cabeza de fórmulas, y tus matraces con metano, amoníaco, hidrógeno, dióxido de carbono y todos aquellos gases que esperamos que tenga un planeta primitivo en el que no hay vida; cocínalos todos; haz pasar descargas de relámpagos a través de esta atmósfera simulada y descargas de inspiración a través de tu cerebro; trae los métodos químicos más avanzados que tengas, y proporciónanos tu mejor estimación química de la probabilidad de que un planeta típico genere, de forma espontánea, una molécula que se autoduplique. O, poniéndolo de otra manera, ¿cuánto tendríamos que esperar antes de que los sucesos químicos aleatorios producidos en el planeta, los choques térmicos de los átomos y moléculas al azar, dieran como resultado una molécula que se autoduplicase?

Los químicos no conocen la respuesta a esta pregunta. Muchos químicos modernos dirían que tendríamos que esperar un tiempo muy largo para los estándares de una vida humana, pero quizá no tanto para los del tiempo cosmológico. La historia de los fósiles de la Tierra sugiere que tenemos alrededor de mil millones de años –un «eón», utilizando una definición moderna adecuada– para jugar, ya que es más o menos el tiempo transcurrido entre el origen de la Tierra, hace alrededor de 4 500 millones de años y la era en la que aparecen los primeros organismos fosilizados. Pero lo esencial de nuestro argumento del «número de planetas» es que, aunque el químico dijera que tendríamos que esperar un «milagro», esperar 100 trillones de años, más tiempo del que ha existido el universo, todavía podríamos aceptar este veredicto con ecuanimidad. Hay probablemente más de 100 trillones de planetas disponibles en el universo. Si cada uno de ellos durase tanto como la Tierra, nos daría alrededor de 1 000 cuatrillones de años-planeta para jugar. ¡Eso lo solucionaría! Un milagro se traduce en algo práctico mediante unas multiplicaciones.

Hay una premisa oculta en este argumento. Bueno, hay muchas, pero una en particular, sobre la que quisiera hablar. Una

vez que se ha originado la vida (han aparecido los duplicadores y la selección cumulativa), avanza siempre hasta un punto donde la inteligencia de sus criaturas evoluciona lo suficiente como para especular sobre sus orígenes. Si no es así, nuestra estimación de la intervención del azar debería reducirse de acuerdo con esto. Para ser más exacto, la mayor probabilidad en contra del origen de la vida, en cualquier planeta que permitan postular nuestras teorías, sería igual al número de planetas disponibles en el universo, dividido por la probabilidad de que la vida, una vez iniciada, produjese la evolución de una inteligencia suficiente para especular sobre sus propios orígenes.

Puede parecer un poco extraño que «una inteligencia suficiente para especular sobre sus propios orígenes» sea una variable relevante. Para comprender por qué es así, hay que considerar la hipótesis alternativa. Supongamos que el origen de la vida fuese un suceso bastante probable, pero que la evolución posterior de la inteligencia fuese tan improbable, que necesitase un gran golpe de suerte. Supongamos que el desarrollo de la inteligencia fuese tan improbable que sólo haya tenido lugar en un planeta del universo, aun cuando la vida se hubiese originado en muchos planetas diferentes. Entonces, ya que sabemos que somos lo suficientemente inteligentes como para discutir esta cuestión, sabemos que la Tierra tiene que ser ese planeta. Supongamos ahora que el origen de la vida, y el origen de la inteligencia una vez que la vida está presente, sean *ambos* sucesos muy improbables. Entonces la probabilidad de que un planeta cualquiera, como la Tierra, disfrute de ambos golpes de suerte sería el *producto* de dos probabilidades pequeñas, y esto es una probabilidad mucho más pequeña.

Si, como pensamos, en nuestra teoría de cómo llegamos a existir, se nos permite postular una cierta intervención del azar, ésta tendría como límite la cifra de planetas elegibles en el universo. Una vez definida la magnitud de esta intervención, podríamos «gastarla» como un bien limitado para dar nuestra explicación sobre nuestra propia existencia. Si utilizamos casi todo, en el transcurso de la evolución, para explicar cómo empezó la vida en un planeta, entonces no podremos postular muchas cosas más en el resto de nuestra teoría, por ejemplo, la evolución cumulativa del cerebro y la inteligencia. Si no utilizamos todo para explicar el origen de la vida, dejaremos algo para explicar nuestra teoría sobre la evolución posterior, después de que hubiese comenzado a funcionar la selección cumulativa. Si usamos la mayor parte de esta intervención para explicar el origen de la inteligencia, entonces no dejaremos mucho para explicar el origen de la vida: tendríamos que crear una teoría que hiciese el

origen de la vida casi inevitable. Alternativamente, si no necesitamos utilizar todo para explicar esos dos estadios de nuestra teoría, podríamos usar lo que sobra para postular la existencia de vida en cualquier otro lugar del universo.

Mi idea personal es que, una vez que la selección cumulativa comienza a actuar, sólo necesitamos postular una intervención relativamente pequeña del azar en la evolución posterior de la vida y de la inteligencia. La selección cumulativa, una vez iniciada, me parece lo suficientemente poderosa como para hacer no sólo probable, sino inevitable, la evolución de la inteligencia. Esto significa que podemos, si queremos, emplear virtualmente toda la intervención postulable del azar en una gran jugada, en nuestra teoría sobre el origen de la vida en un planeta. Por tanto, tenemos a nuestra disposición, si queremos usarla, una probabilidad de uno en cien trillones como límite (o de uno en cualquier cifra de planetas disponibles que pensemos que hay) para emplearla en nuestra teoría sobre el origen de la vida. Ésta es la máxima intervención del azar que podemos postular. Supongamos que queremos sugerir, por ejemplo, que la vida empezó cuando el DNA y su maquinaria de duplicación proteica comenzaron a existir de forma espontánea. Podemos permitirnos el lujo de esta extravagante teoría siempre que la probabilidad en contra de que esta coincidencia se produzca en un planeta no exceda la cifra de uno en cien trillones.

Esta asignación puede parecer grande. Tal vez demasiado para acomodar la aparición espontánea del DNA o el RNA. Pero aun así no se aproxima lo suficiente como para permitirnos hacerlo sin la colaboración de la selección cumulativa. La probabilidad en contra del montaje de un cuerpo bien diseñado que vuele como un vencejo, o nade como un delfín, o vea como un halcón, con una sola intervención del azar —selección en una sola etapa— es muchísimo mayor que el número de átomos del universo, dejando aparte el número de planetas. No, lo cierto es que necesitaremos una gran intervención de la selección cumulativa en nuestra explicación sobre la vida.

Pero aunque en nuestra teoría sobre el origen de la vida tenemos derecho a decidir que el azar intervenga en una proporción máxima que ascienda, quizás, a una probabilidad de uno en cien trillones, presiento que no vamos a necesitar más que una pequeña fracción de la misma. El origen de la vida en un planeta puede que sea un suceso muy poco probable, por supuesto, para nuestros estándares actuales, o para los estándares de un laboratorio de bioquímica, y aun así ser lo suficiente como para haber ocurrido, no sólo una, sino muchas veces, en todo el universo. Podemos contemplar el argumento estadístico sobre

el número de planetas como un argumento en último extremo. Al final del capítulo presentaré una cuestión paradójica, ya que la teoría que estamos buscando puede que *necesite* parecer poco probable, incluso milagrosa, para nuestro juicio subjetivo (debido a la manera como ha sido formado nuestro juicio subjetivo). Sin embargo, es razonable empezar a buscar esa teoría sobre el origen de la vida con un grado mínimo de improbabilidad. Si la teoría de que el DNA y su maquinaria de duplicación se originaron de manera espontánea es tan poco probable que nos obligue a asumir que la vida es muy rara en el universo, y que incluso puede ser única en la Tierra, nuestro primer recurso sería tratar de encontrar una teoría con más probabilidades. Así pues, ¿podemos presentar cualquier especulación sobre los caminos relativamente *probables*, en los que la selección cumulativa pudo haber tenido sus comienzos?

La palabra «especulación» tiene un tono peyorativo, innecesario aquí. No podemos sino especular cuando los sucesos de los que estamos hablando tuvieron lugar hace cuatro mil millones de años y en un mundo que debía de ser radicalmente distinto del que conocemos hoy. Por ejemplo, es casi seguro que no había oxígeno libre en la atmósfera. Aunque la química del mundo puede haber cambiado, las *leyes* de la química no lo han hecho (por eso se llaman leyes), y los químicos modernos saben lo suficiente sobre ellas como para hacer algunas especulaciones bien fundamentadas que tendrían que pasar rigurosas pruebas de credibilidad impuestas por las mismas. No se puede especular de manera salvaje e irresponsable, permitiendo a la imaginación correr desenfrenada en forma de panaceas insatisfactorias del espacio ficción, tales como los *hiperdrives* (hipermovimientos), *time warps* (deformaciones del tiempo) e *infinite improbability drives* (movimientos de improbabilidad infinita). De todas las especulaciones posibles sobre el origen de la vida, la mayoría chocan con las leyes de la química y pueden descartarse, incluso si utilizamos nuestro socorrido argumento estadístico sobre el número de planetas en toda su extensión. Una cuidadosa especulación selectiva es, por tanto, un ejercicio constructivo. Pero hay que ser químico para realizarla.

Soy biólogo, no químico, y debo creer en los químicos y asumir sus cálculos como correctos. Distintos químicos tienen distintas teorías favoritas, por lo que no hay escasez. Podría tratar de exponerlas todas con imparcialidad. Esto sería lo correcto en un libro de texto para estudiantes. Pero éste no lo es. La idea básica del *relojero ciego* es que no necesitamos postular la existencia de un diseñador para comprender la vida, o cualquier otra cosa en el universo. Estamos preocupados por la clase de solu-

ción que debemos encontrar, debido al tipo de problema con el que nos enfrentamos. Pienso que queda mejor explicado sin necesidad de considerar muchas teorías concretas, sólo *una* que sirva de ejemplo de cómo debería resolverse un problema básico: cómo comenzó la selección cumulativa.

Pero ¿qué teoría escoger como muestra representativa? La mayoría de los libros de texto conceden mayor peso al grupo de teorías basadas en la existencia de un «caldo orgánico primitivo». Parece probable que la atmósfera de la Tierra, antes del comienzo de la vida, fuese como la de otros planetas en los que no se ha originado aún. No había oxígeno, y sí mucho hidrógeno, agua, dióxido de carbono, y muy probablemente algo de amoníaco, metano y otros gases orgánicos simples. Los químicos saben que los ambientes sin oxígeno tienden a fomentar la síntesis espontánea de compuestos orgánicos. Han reconstruido en matraces las condiciones de la Tierra primitiva. Han hecho pasar chispas eléctricas a su través, simulando relámpagos, y luz ultravioleta, que habría sido mucho más intensa antes de que la Tierra tuviese una capa de ozono que la protegiese de los rayos del Sol. Los resultados de estos experimentos son interesantes. Se formaron espontáneamente moléculas orgánicas, algunas del mismo tipo, en términos generales, que las que se encuentran normalmente en las cosas vivas. No aparecieron ni el DNA ni el RNA, pero sí los bloques básicos que forman estas grandes moléculas, que se denominan purinas y pirimidinas. También se formaron los bloques básicos que constituyen las proteínas, los aminoácidos. El eslabón perdido en esta clase de teorías es todavía el origen de la duplicación. Los bloques básicos no llegaron a juntarse para formar una cadena que se autoduplicase como el RNA. Puede que un día lo hagan.

En cualquier caso, no es la teoría del caldo orgánico primitivo la escogida para ilustrar la clase de solución que debemos buscar. La escogí en mi primer libro, *El gen egoísta*, de manera que aquí pienso arriesgarme con otra que, de alguna forma, está menos de moda (aunque recientemente haya comenzado a ganar apoyo), y que me parece que tiene alguna probabilidad de ser correcta. Su audacia es atractiva, e ilustra bien las propiedades que debe tener cualquier teoría satisfactoria sobre el origen de la vida. Es la teoría «inorgánica mineral» del químico Graham Cairns-Smith, de Glasgow, propuesta hace veinte años y desarrollada y elaborada desde entonces en tres libros, el último de los cuales, *Seven Clues to the Origin of Life* (Siete claves para el origen de la vida), trata el origen de la vida como un misterio que necesita una solución a lo Sherlock Holmes.

El punto de vista de Cairns-Smith sobre la maquinaria del

DNA/proteína es que probablemente comenzó a existir en un período más bien reciente, quizá hace tan sólo tres mil millones de años. Antes existieron muchas generaciones de selección cumulativa, basadas en unas entidades duplicadoras bastante diferentes. Una vez que el DNA se hizo presente, resultó ser mucho más eficiente como duplicador, y mucho más poderoso en sus efectos sobre su propia duplicación, que el sistema original que lo engendró, que fue desechado y olvidado. De acuerdo con este punto de vista, la moderna maquinaria del DNA es una advenediza, una usurpadora reciente del papel de duplicador elemental, que ha sustituido en este papel a otro duplicador más antiguo y primitivo. Puede haber habido incluso una serie completa de tales usurpaciones, pero el proceso original de duplicación tiene que haber sido lo suficientemente simple como para haber ocurrido mediante lo que yo he apodado «selección en una sola etapa».

Los químicos dividen su materia en dos ramas principales, orgánica e inorgánica. La química orgánica es la química de un elemento en particular, el carbono. La química inorgánica abarca el resto. El carbono es importante y merece tener su propia rama privada de la química, en parte, porque la química de la vida es la química del carbono y, en parte, porque estas mismas propiedades que hacen a la química del carbono apropiada para la vida también la hacen apropiada para procesos industriales, como los de la industria del plástico. La propiedad esencial de los átomos de carbono es que pueden unirse formando un repertorio ilimitado de diferentes clases de moléculas muy grandes. Otro elemento que tiene algunas de estas mismas propiedades es el silicio. Aunque la química de la vida moderna en la Tierra sea toda química del carbono, puede que no resulte cierto en todo el universo, y puede que no haya sido siempre cierto en la Tierra. Cairns-Smith cree que la vida original sobre este planeta estaba basada en cristales inorgánicos, como los silicatos, que se duplicaban a sí mismos. Si esto es cierto, los duplicadores orgánicos, y eventualmente el DNA, deben de haber sustituido o usurpado su papel, con posterioridad.

Suministra algunos argumentos que apoyan la credibilidad general de esta idea de «sustitución». Un arco de piedra, por ejemplo, es una estructura estable, capaz de permanecer en pie durante muchos años, aunque no tenga cemento que la sostenga. Construir una estructura compleja durante la evolución es como tratar de construir un arco sin cemento permitiendo tocar sólo una piedra cada vez. Si se piensa en la tarea, no podría llevarse a cabo. El arco permanece en pie una vez que la última piedra esté colocada en su sitio, pero los estadios intermedios son ines-

tables. Sin embargo, es bastante fácil construir el arco, si se permite quitar piedras o añadirlas. Se empieza formando un montón de piedras, luego se construye el arco descansando sobre la parte superior de esta sólida base. Cuando todo el arco esté en posición, incluyendo la piedra angular vital en su parte superior, se quitan con cuidado las piedras de soporte y, con un poco de suerte, el arco permanecerá de pie. Stonehenge es incomprensible, hasta que nos damos cuenta de que los constructores utilizaron algún tipo de andamiaje, o quizá rampas de tierra, *que ya no están allí.* Podemos ver sólo el producto final, y tenemos que deducir el andamiaje que se ha desvanecido. De manera similar, el DNA y las proteínas son dos pilares de un arco estable y elegante, que persiste una vez que todas sus partes existen simultáneamente. Es difícil imaginárselo originándose por un proceso paso a paso, a menos que algún andamiaje primitivo haya desaparecido. Este andamiaje, a su vez, debe de haber sido construido por una forma más antigua de selección cumulativa, sobre cuya naturaleza sólo podemos opinar. Pero debe de haberse basado en entidades que se duplicaban y tenían poder sobre su propio futuro.

Cairns-Smith opina que los duplicadores originales eran cristales de materiales inorgánicos, como los encontrados en las arcillas y lodos. Un cristal es una gran formación de átomos y moléculas, dispuestos con un orden en estado sólido. Debido a las propiedades que podemos considerar como su «forma», los átomos y las pequeñas moléculas tienden a empaquetarse juntos, de una manera fija y ordenada. Es casi como si «quisieran» estar encajados juntos de una manera determinada, pero esta ilusión es sólo una consecuencia inadvertida de sus propiedades. Su manera «preferida» de encajarse da forma al cristal entero. También significa que, incluso en un cristal grande como el diamante, cualquier parte del cristal es *exactamente* igual a cualquier otra parte, excepto donde hay defectos. Si pudiésemos reducirnos a escala atómica, podríamos ver hileras casi interminables de átomos extendiéndose hacia el horizonte en línea recta, galerías de repetición geométrica.

Y ya que estamos interesados en su duplicación, lo primero que debemos saber es si los cristales pueden duplicar su estructura. Están hechos de miríadas de capas de átomos (o su equivalente), y cada capa se construye sobre una capa anterior. Los átomos (o los iones, no necesitamos preocuparnos por la diferencia) flotan libres en solución, pero si encuentran un cristal muestran una tendencia natural a encajarse en una posición sobre su superficie. Una solución de sal común contiene iones de sodio y iones de cloro entrechocando de manera más o menos

caótica. Un cristal de sal común esta formado por iones de sodio, alternándose con iones de cloro empaquetados, dispuestos ordenadamente, formando ángulos rectos entre sí. Cuando los iones que flotan en el agua se encuentran con la dura superficie del cristal, tienden a adherirse a él. Y lo hacen en el sitio correcto para producir una nueva capa que se añade al cristal, idéntica a la que está situada debajo. Así que una vez que un cristal comienza a crecer, cada capa que se añade es igual a la capa anterior.

Algunas veces los cristales comienzan a formarse en una solución de manera espontánea. En otras ocasiones, tienen que ser iniciados por partículas o polvo, o por cristales caídos desde alguna otra parte. Cairns-Smith nos invita a realizar el siguiente experimento. Disolver una gran cantidad de fijador fotográfico con «hipoclorito» en agua muy caliente. Dejar que se enfríe la solución, teniendo cuidado de que no caiga dentro ninguna gota de polvo. La solución está ahora «sobresaturada», lista y esperando para hacer cristales, pero sin cristales iniciadores que pongan en marcha el proceso. Cito un párrafo de las *Siete claves para el origen de la vida (Seven Clues to the Origin of Life)*, de Cairns-Smith:

> Quitar con cuidado la tapa del matraz, dejar caer un pequeño trozo de cristal de hipoclorito en la superficie de la solución y contemplar divertidos qué sucede. El cristal crece visiblemente: se rompe de vez en cuando y los trozos crecen también... Pronto el matraz estará lleno de cristales; algunos, de varios centímetros de longitud. Después de unos pocos minutos, todo se para. La solución mágica ha perdido su poder, aunque, si se quiere otra sesión, sólo hay que calentar y dejar enfriar el matraz de nuevo... estar sobresaturado significa tener más sustancia disuelta de la que debería haber... La solución fría sobresaturada no sabe literalmente qué hacer. Hay que «decírselo», añadiendo un trozo de cristal que ya tiene sus unidades (miles y miles de millones de ellas) empaquetadas en la forma que es característica para los cristales de hipoclorito. La solución tiene que ser iniciada.

Algunas sustancias químicas tienen la posibilidad de cristalizar de dos maneras alternativas. El grafito y el diamante, por ejemplo, son los dos cristales de carbono puro. Sus átomos son idénticos. Las dos sustancias sólo se diferencian entre sí en el patrón geométrico con el que están empaquetados los átomos de carbono. En los diamantes, los átomos de carbono están dispuestos con un patrón tetraédrico extremadamente estable. Por eso son tan duros. En el grafito, los átomos de carbono están dispuestos en hexágonos planos estratificados uno encima de

otro. La unión entre las capas es débil, y resbalan; por eso el grafito tiene un tacto grasiento y se utiliza como lubricante. Pero no es posible cristalizar diamantes iniciándolos a partir de una solución, como se hace con el hipoclorito. Si lo fuera, uno podría hacerse rico; pero, pensándolo bien, no, ya que cualquier tonto podría hacer lo mismo.

Supongamos ahora que tenemos una solución sobresaturada de una sustancia como el hipoclorito, ávida por cristalizar, y como el carbono, capaz de cristalizar de dos maneras diferentes. Una forma podría ser similar al grafito, con los átomos dispuestos en capas, que produjesen la formación de pequeños cristales planos; la otra daría origen a trozos de cristales, en forma de diamante. Dejemos caer simultáneamente en nuestra solución sobresaturada dos cristales diminutos, uno plano y otro con forma de diamante. Podemos describir lo que sucedería basándonos en la descripción de Cairns-Smith, de su experimento con hipoclorito. Uno observa divertido lo que sucede. Los dos cristales crecen visiblemente, se rompen de vez en cuando, y los trozos crecen también. Los cristales planos dan lugar a una población de cristales planos. Los cristales con forma de diamante dan lugar a una población de idéntica forma. Si hubiera alguna tendencia hacia un tipo de cristal en el sentido de crecer y dividirse más rápidamente que el otro, tendríamos una forma simple de selección natural. Pero todavía falta un ingrediente vital para que se origine un cambio evolutivo. Se trata de la variación hereditaria, o algo equivalente. En lugar de haber sólo dos tipos de cristal, debería haber un rango completo de variaciones menores, que formasen descendencias con una forma similar, y que a veces «sufriesen mutaciones» que produjesen formas nuevas. ¿Tienen los cristales reales algo que se corresponda con las mutaciones hereditarias?

Las arcillas, los lodos y las rocas están formados por pequeños cristales. Abundan sobre la Tierra y es probable que desde siempre. Cuando se observa la superficie de algunos tipos de arcilla y otros minerales con un microscopio electrónico de barrido, se contempla una vista divertida y bella. Los cristales crecen como hileras de flores o cactus, jardines de pétalos de rosa inorgánicos, espirales diminutas como cortes transversales de plantas jugosas, órganos tubulares encrespados, formas angulares complicadas, dobladas como si fuese un «origami» cristalino en miniatura, formas de crecimiento serpenteante, como moldes de gusanos o pasta de dientes exprimida. Los patrones ordenados se hacen aún más manifiestos utilizando niveles superiores de magnificación. A niveles que revelan la oposición actual de los átomos, la superficie de un cristal tiene toda la regularidad

de una pieza de punto espigado de lana tejido a máquina. Pero —y aquí está lo importante— hay defectos. Justo en el centro de un espacio ordenado puede haber un trozo, idéntico al resto, excepto en que está retorcido con un ángulo diferente, de manera que el «tejido» sigue en otra dirección. O puede extenderse en la misma dirección, pero cada hilera se ha «deslizado» media hilera hacia un lado. Casi todos los cristales que se producen en la naturaleza tienen defectos. Y, una vez que ha aparecido un defecto, tiende a ser copiado, ya que las capas adicionales del cristal se van incrustando encima de él.

Los defectos pueden producirse en cualquier parte de la superficie de un cristal. Si al lector le gusta pensar en la capacidad de almacenamiento de información (a mí me gusta), puede imaginarse la enorme cifra de patrones de defectos diferentes que podrían crearse sobre la superficie de un cristal. Todos aquellos cálculos sobre el almacenamiento del Nuevo Testamento en el DNA de una sola bacteria podrían hacerse con la misma grandiosidad en cualquier cristal. La ventaja que tiene el DNA sobre los cristales normales radica en el mecanismo mediante el cual puede leerse su información. Dejando a un lado el problema de la lectura, se podría idear un código arbitrario, en el que los defectos en la estructura atómica del cristal denotasen números binarios. Podrían almacenarse entonces varios Nuevos Testamentos en un cristal mineral del tamaño de la cabeza de un alfiler. A mayor escala, es la manera como se almacena la información musical en la superficie de un disco leído por láser *(compact disk)*. Las notas musicales son convertidas por el ordenador en números binarios. Se utiliza un láser para grabar un patrón de defectos diminutos en la, por otra parte, superficie lisa cristalina del disco. Cada pequeño defecto grabado corresponde a un número binario 1 (o a un 0, las denominaciones son arbitrarias). Cuando se escucha el disco, otro haz de láser «lee» el patrón de defectos, y un ordenador especial construido en el tocadiscos convierte los números binarios en vibraciones sonoras de nuevo, que son amplificadas para que puedan oírse.

Aunque los discos de láser se utilicen hoy día principalmente para registrar música, podría almacenarse toda la *Enciclopedia Británica* en uno de ellos, y leerse utilizando la misma técnica. Los defectos en los cristales a nivel atómico son mucho más pequeños que los defectos grabados en la superficie del disco de láser, de forma que, en teoría, podría almacenarse más información en un área definida. Las moléculas de DNA, cuya capacidad para almacenar información nos ha impresionado, están cercanas a los propios cristales. Aunque los cristales de arcilla podrían almacenar teóricamente la misma cantidad prodigiosa de

información que el DNA o los discos de láser, nadie está sugiriendo que lo hagan. El papel de la arcilla y los demás cristales minerales, en teoría, sería el de actuar como los duplicadores originales de «baja tecnología», aquellos que fueron eventualmente reemplazados por la alta tecnología del DNA. Se formaron de una manera espontánea en las aguas de nuestro planeta, sin la elaborada «maquinaria» que necesita el DNA; desarrollaron defectos de una manera espontánea, algunos de los cuales pudieron ser replicados en las capas añadidas del cristal. Si luego se rompieron fragmentos de cristales apropiadamente defectuosos, podemos imaginárnoslos actuando como «iniciadores» de nuevos cristales, cada uno de los cuales «heredaría» el patrón de defectos de sus «progenitores».

Así pues, tenemos un cuadro especulativo de cristales minerales en la Tierra primitiva, que muestran algunas de las propiedades de la duplicación, multiplicación, herencia y mutación que habrían sido necesarias para que comenzase a actuar una forma de selección cumulativa. Falta todavía el ingrediente del «poder»: la naturaleza de los duplicadores tiene que influenciar de alguna manera su propia posibilidad de ser duplicado. Cuando hablamos de los duplicadores en abstracto, vimos que el «poder» podía consistir en propiedades directas del propio duplicador, propiedades intrínsecas como la «adherencia». A este nivel elemental, el nombre de «poder» parece apenas justificado. Lo utilizo sólo por lo que puede llegar a ser en los estadios posteriores de la evolución: el poder de un colmillo de una serpiente venenosa, por ejemplo, para propagar (por sus consecuencias indirectas sobre la supervivencia de la serpiente) el DNA que codifica los colmillos. Si los duplicadores originales de baja tecnología eran cristales minerales, o precursores orgánicos directos del propio DNA, podemos suponer que el «poder» que ejercieron fue directo y elemental, como la adherencia. Los niveles de poder avanzados, como el colmillo de una serpiente venenosa o la flor de una orquídea, llegaron mucho más tarde.

¿Qué podría significar «poder» para una arcilla? ¿Qué propiedades incidentales de la arcilla podrían influir en la posibilidad de que la misma variedad de arcilla se propagase por la campiña? Las arcillas están hechas de bloques químicos básicos, como el ácido silícico y los iones metálicos, que se encuentran en solución en los ríos y corrientes, y han sido disueltos —«por los fenómenos atmosféricos»— a partir de rocas situadas corriente arriba. Si las condiciones son correctas, cristalizarán de nuevo corriente abajo, formando arcillas. (La «corriente», en este caso, es probable que signifique más las filtraciones y goteos de las aguas subterráneas que la corriente abierta de un río. Pero, por

simplicidad, continuaré utilizando la palabra corriente en sentido amplio.) El hecho de que se permita o no la creación de un tipo de cristal de arcilla determinado depende, entre otras cosas, del ritmo y el patrón del flujo de la corriente. Pero los depósitos de arcilla pueden *influenciar* el flujo de la corriente. Lo hacen inadvertidamente cambiando el nivel, forma y textura del suelo a través del cual está fluyendo el agua. Consideremos una variedad de arcilla que tenga la propiedad de variar la estructura del suelo, de forma que se acelere el flujo de la corriente. Las consecuencias serían que la arcilla implicada se disolvería de nuevo. Esta clase de arcilla, por definición, no tendría mucho «éxito». Otra clase de arcilla que no tendría éxito sería aquella que alterase el flujo de la corriente de forma que resultase favorecida una variedad de arcilla rival.

No estamos sugiriendo, por supuesto, que las arcillas «quieran» seguir existiendo. Hablamos siempre de consecuencias incidentales, sucesos que son consecuencia de las propiedades que tiene el duplicador. Consideremos otra variedad de arcilla. Una que produzca un enlentecimiento del flujo de la corriente que haga que aumenten los depósitos futuros de su *propia* clase de arcilla. Es obvio que esta segunda variedad tenderá a hacerse más común, porque manipula las corrientes a su propia «conveniencia». Será una variedad de arcilla que tendrá «éxito». Pero hasta ahora sólo hemos tratado con la selección en una sola etapa. ¿Podría ponerse en marcha alguna forma de selección cumulativa?

Para especular un poco más, supongamos que una variedad de arcilla pueda mejorar sus posibilidades de ser depositada, estancando la corriente. Sería una consecuencia inadvertida de un defecto peculiar en su estructura. En cualquier corriente en la que exista esta clase de arcilla, se formarían grandes balsas de agua estancada, poco profundas, y el flujo principal se desviaría hacia un nuevo curso. En estas balsas de agua inmóvil, se depositaría más arcilla del mismo tipo. Proliferaría entonces una sucesión de estas balsas a lo largo de cualquier corriente que estuviese «infectada» con cristales iniciadores de este tipo de arcilla. Como el flujo principal de la corriente ha sido desviado, las balsas de agua poco profundas se vaciarán durante la estación seca. La arcilla se secará y resquebrajará bajo la acción del sol, y las capas superiores serán barridas por el aire, en forma de polvo. Cada partícula de polvo heredaría el defecto estructural característico de la arcilla progenitora que originó el embalse, la estructura que le dio sus propiedades para hacer embalses. Por analogía con la lluvia de información genética de mi sauce, que caía sobre el canal, podríamos decir que el polvo

transporta «instrucciones» sobre cómo producir embalses en las corrientes y, eventualmente, más polvo. El polvo se irá extendiendo, ampliando su área por acción del viento, y es muy posible que algunas partículas del mismo aterricen en otra corriente hasta ahora no «infectada» con la semilla de esta clase de arcilla. Una vez infectada con el tipo de polvo apropiado, empezarán a crecer cristales de arcilla productora de embalses en la nueva corriente, y comenzará de nuevo el ciclo completo de deposición, formación de un embalse, secado y erosión.

Llamar a esto un ciclo «vital» sería dar por supuesta una cuestión importante, pero es un ciclo de algún tipo, y comparte con los verdaderos ciclos vitales la capacidad de iniciar la selección cumulativa. Como las corrientes están infectadas con «semillas» de polvo que han venido volando desde otras corrientes, podemos clasificarlas por orden de «antigüedad» y «descendencia». La arcilla que forma balsas en la corriente B llegó allí en forma de cristales de polvo desde la corriente A. Eventualmente, las balsas de la corriente B se secarán y formarán polvo, que infectará las corrientes F y P. Podemos ordenar las corrientes respecto a la fuente de sus arcillas en «árboles genealógicos». Cada corriente infectada tendrá una corriente «progenitora», y posiblemente más de una corriente «hija». Cada corriente es análoga a un cuerpo, cuyo «desarrollo» esté influenciado por «genes» formados por la simiente del polvo, un cuerpo que engendrará nuevas semillas de polvo. Cada «generación» del ciclo comienza cuando los cristales iniciadores se desprenden de la corriente progenitora en forma de polvo. La estructura cristalina de cada partícula es una copia de la arcilla de la corriente original. Esta estructura se transmite a la corriente hija, donde crece, se multiplica y, finalmente, envía de nuevo «simientes» hacia otro sitio.

La estructura cristalina ancestral se mantiene a lo largo de las generaciones, a menos que haya un error ocasional en el crecimiento del cristal, una alteración ocasional en el patrón de establecimiento de los átomos. Las capas posteriores del cristal copiarán el mismo defecto y, si el cristal se rompe, dará lugar a una subpoblación de cristales alterados. Ahora bien, si la alteración hace que el cristal sea más o menos eficiente en el ciclo de formación de embalse/secado/erosión, afectará a las copias de «generaciones» posteriores. Los cristales alterados podrían tener, por ejemplo, mayores posibilidades de dividirse («reproducirse»). La arcilla formada a partir de cristales alterados podría tener un mayor poder para formar embalses de una manera cualquiera entre varias especificadas. Podría resquebrajarse bajo la acción del sol, o desmenuzarse formando polvo, con mayor

facilidad. Las partículas de polvo podrían mantenerse más tiempo en el aire, como el plumón de una semilla de sauce. Algunos tipos de cristal podrían inducir un acortamiento del «ciclo vital», acelerando así su «evolución». Hay muchas oportunidades para que las «generaciones» sucesivas se vuelvan progresivamente «mejores» y logren transmitirlo a las generaciones posteriores. En otras palabras, hay muchas oportunidades para que se ponga en marcha una selección cumulativa rudimentaria.

Estos pequeños vuelos de la fantasía, adornos del propio Cairns-Smith, afectan sólo a una de las distintas clases de «ciclos vitales» minerales que podrían haber iniciado la selección cumulativa a lo largo de su camino trascendental. Hay otras. Diferentes variedades de cristales podrían ganar acceso a nuevas corrientes, no como «simientes» de polvo, sino dividiéndolas en otras muchas pequeñas, que se extenderían alrededor, uniéndose con nuevos sistemas fluviales e infectándolos. Algunas variedades podrían proyectar cascadas que desgastarían las rocas con mayor rapidez y, por tanto, acelerarían la disolución de materias primas necesarias para fabricar nuevas arcillas corriente abajo. Algunas variedades de cristales podrían mejorar, haciendo que las condiciones fuesen duras para las variedades «rivales» que compiten por las mismas materias primas. Algunas variedades podrían transformarse en «depredadoras», destruyendo las variedades rivales y utilizando sus elementos como materias primas. Hay que recordar que no hay ninguna sugerencia de proyecto «deliberado», tanto aquí como en la vida moderna basada en el DNA. Se trata de que el mundo tiende a llenarse automáticamente de aquellas variedades de arcilla (o de DNA) que tienen propiedades que las hacen persistir y diseminarse.

Ahora nos moveremos al siguiente estadio del argumento. Algunas familias de cristales podrían catalizar la síntesis de nuevas sustancias que les ayudasen en su transmisión a lo largo de «generaciones». Estas sustancias secundarias no tendrían (por lo menos, al principio) sus propios linajes de antepasados y descendientes, sino que serían fabricadas de nuevo por cada generación de duplicadores primarios. Podrían ser contempladas como herramientas de las familias de cristales duplicadores, los comienzos de los «fenotipos» primitivos. Cairns-Smith cree que las moléculas *orgánicas* tuvieron su importancia entre las «herramientas» no duplicadoras de los duplicadores inorgánicos cristalinos. Las moléculas orgánicas se utilizan con frecuencia en la industria química inorgánica por sus efectos sobre el flujo de los fluidos, y sobre la fragmentación o crecimiento de las partículas inorgánicas: abreviando, justo la clase de efectos que podrían haber influenciado el «éxito» de algunas familias de cristales duplica-

dores. Por ejemplo, un mineral de arcilla, con el hermoso nombre de montmorillonita, tiende a fragmentarse en presencia de pequeñas cantidades de una molécula orgánica, con el nombre menos exquisito de carboximetil celulosa. Por otra parte, cantidades más pequeñas de carboximetil celulosa, tienen el efecto contrario, y ayudan a que se mantengan juntas las partículas de montmorillonita. El tanino, otra clase de molécula orgánica, se utiliza en la industria del petróleo para lograr que los lodos sean más fáciles de perforar. Si los buscadores de petróleo pueden manejar, o explotar las moléculas orgánicas para manipular el flujo y la perforabilidad de los lodos, no hay razón para pensar que la selección cumulativa no hubiera llegado a esta misma clase de explotación en el caso de los minerales que se autorreplican.

En este punto, la teoría de Cairns-Smith consigue una especie de plus gratis de credibilidad. Otros químicos, que apoyan las teorías más convencionales del «caldo orgánico primitivo», aceptan desde hace tiempo la contribución de los minerales de arcilla. La siguiente cita es de uno de ellos (D. M. Anderson): «Está ampliamente aceptado que algunas, quizá muchas, de las reacciones y procesos abióticos que condujeron al origen de los microorganismos duplicadores sobre la Tierra ocurrieron al principio de la historia de la Tierra, en estrecha proximidad con la superficie de los minerales de arcilla y otros sustratos inorgánicos.» El autor continúa describiendo una lista de cinco «funciones» de los minerales de arcilla en su papel de ayuda al origen de la vida orgánica, por ejemplo, «concentración de los reactivos químicos por adsorción». No necesitamos exponer las cinco aquí, o comprenderlas. Lo importante es que se les puede dar la vuelta a cada una de estas cinco «funciones». Sirven para mostrar la estrecha asociación que puede existir entre la síntesis química orgánica y las superficies de arcilla. Es, por tanto, un plus para la teoría de que los duplicadores de arcilla sintetizaban moléculas orgánicas y las utilizaban para sus fines.

Cairns-Smith discute, con más detalles de los que puedo facilitar aquí, los primeros usos que sus duplicadores de cristal-arcilla habrían dado a las proteínas, azúcares y, los más importantes de todos, los ácidos nucleicos, como el RNA. Sugiere que el RNA se utilizó en un principio con un fin estructural, como los buscadores de petróleo utilizan el tanino, o nosotros el jabón y los detergentes. Las moléculas del tipo del RNA, debido a sus cadenas centrales cargadas negativamente, estarían revistiendo preferentemente la superficie externa de las partículas de arcilla. Esto nos está llevando a unos dominios de la química más allá de nuestro alcance. Para nuestros propósitos, lo que importa es

que el RNA, o algo parecido, estuvo presente durante bastante tiempo antes de llegar a autoduplicarse. Cuando finalmente lo logró, este mecanismo evolucionó gracias a los «genes» del mineral cristalino para mejorar su eficiencia en la fabricación del RNA (u otras moléculas similares). Pero, una vez que comienza a existir una molécula que se autoduplica, puede ponerse en marcha un nuevo tipo de selección cumulativa. Aunque fuesen en su origen un producto secundario, los nuevos duplicadores demostraron ser mucho más eficientes que los cristales originales a los que terminaron sustituyendo. Sufrieron una evolución adicional, y perfeccionaron el código del DNA como lo conocemos hoy en día. Los duplicadores minerales originales fueron apartados como un andamiaje usado, y la vida moderna evolucionó a partir de un antepasado común, relativamente reciente, con un sistema genético uniforme único y una bioquímica también uniforme, en gran medida.

En *El gen egoísta* especulé con lo que podría estar ahora en el umbral de un nuevo tipo de sustitución genética. Los duplicadores de DNA crearon «máquinas para sobrevivir»: los cuerpos de los organismos vivos, incluyéndonos nosotros mismos. Como parte de su equipamiento, hicieron evolucionar computadoras a bordo de estos cuerpos: los cerebros. En los cerebros evolucionó la capacidad de comunicarse con otros cerebros mediante el lenguaje y las tradiciones culturales. Pero el nuevo medio ambiente de la tradición cultural abre nuevas posibilidades para las entidades que se autoduplican. Los nuevos duplicadores no son el DNA y los cristales de arcilla. Son patrones de información que crecen sólo en los cerebros o en los productos fabricados artificialmente por ellos: libros, ordenadores, etc. Pero, ya que los cerebros, libros y ordenadores existen, estos nuevos duplicadores, que llamaré memes para distinguirlos de los genes, pueden propagarse de cerebro a cerebro, de un cerebro a un libro, de un libro a un cerebro, de un cerebro a un ordenador, de un ordenador a otro. Según se propagan, pueden cambiar, mutarse. Y quizá los memes «mutantes» pueden ejercer el tipo de influencia que yo llamo el «poder del duplicador». Hay que recordar que esto significa cualquier clase de influencia que afecte a su propia probabilidad de ser propagado. La evolución bajo la influencia de los nuevos duplicadores —evolución memética— está en su infancia. Se manifiesta en los fenómenos que llamamos evolución cultural. La evolución cultural es muchos órdenes de magnitud más rápida que la evolución basada en el DNA, lo que nos lleva a pensar aún más en la idea de la «sustitución». Y si está comenzando a producirse un nuevo tipo de sustitución por otro duplicador, es concebible que despegará tan

lejos como para dejar a su padre el DNA (y a su abuelo, la arcilla, si Cairns-Smith está en lo cierto) mucho más atrás. Si es así, podemos estar seguros de que los ordenadores estarán en el furgón.

¿Podría ocurrir que un día lejano unos ordenadores inteligentes especulen sobre sus propios orígenes perdidos? ¿Caerá alguno de ellos en la verdad herética de que provienen de una forma de vida remota, anterior, arraigada en la química orgánica del carbono, en lugar de en los principios electrónicos basados en el silicio de sus propios cuerpos? ¿Escribirá un Cairns-Smith robot un libro titulado la *Sustitución electrónica*? ¿Volverá a descubrir el equivalente electrónico de la metáfora del arco, y a comprender que los ordenadores no han comenzado a existir de manera espontánea, sino a partir de algún proceso anterior de selección cumulativa? ¿Entrará en detalles y reconstruirá el DNA como un duplicador anterior plausible, víctima de la usurpación electrónica? Y ¿tendrá la suficiente visión como para suponer que incluso el mismo DNA ha sido un usurpador de duplicadores primitivos aún más remotos y primitivos, los cristales de silicatos inorgánicos? Si tiene una mente poética, ¿verá una cierta justicia en el retorno eventual a la vida basada en el silicio, habiendo sido el DNA nada más que un interludio, aunque un interludio que duró más de tres eones?

Esto es ciencia ficción, y es posible que suene forzado. No importa. De momento, lo más inmediato es que la propia teoría de Cairns-Smith y, por supuesto, todas las otras teorías sobre el origen de la vida, pueden sonar forzadas y difíciles de creer. ¿Es posible encontrar la teoría de la arcilla de Cairns-Smith, y la teoría más ortodoxa del caldo orgánico primitivo, salvajemente improbables? ¿Suena como si se necesitara un milagro para hacer que los átomos que están chocando al azar se junten para formar una molécula que se autoduplique? Bien, a veces también me suena a mí. Pero miremos más profundamente en este asunto de los milagros y de la improbabilidad. Así, demostraré un punto paradójico pero, por ello, más interesante. Nosotros, como científicos, deberíamos sentirnos un poco preocupados si el origen de la vida no nos pareciese milagroso. Una teoría aparentemente milagrosa (para la conciencia humana ordinaria) es *exactamente* la clase de teoría que deberíamos estar buscando en este asunto concreto del origen de la vida. Este argumento, que equivale a una discusión sobre lo que quiero decir por «milagro», ocupará el resto del capítulo. En cierto sentido, es una extensión del argumento que esgrimimos antes, sobre los miles de millones de planetas.

Así pues, ¿qué queremos decir con un milagro? Un milagro

es algo que ocurre, pero que resulta extraordinariamente sorprendente. Si una estatua de mármol de la Virgen María de repente agitara su mano hacia nosotros, lo consideraríamos un milagro, porque toda nuestra experiencia y conocimiento nos dice que el mármol no se comporta así. Acabo de pronunciar las palabras «Que me fulmine un rayo en este instante». Si sucediese en este mismo instante, se consideraría un milagro. Pero ninguno de estos dos incidentes sería clasificado por la ciencia como absolutamente imposible. Serían juzgados como muy improbables, la estatua agitando su mano menos probable que lo del rayo. La gente es fulminada por los rayos. Cualquiera de nosotros puede ser fulminado por un rayo, aunque la probabilidad es muy pequeña en un momento dado (a pesar de que el *Guinness Book of Records* muestra una fotografía cautivadora de un hombre de Virginia, apodado el Conductor de rayos humano, recobrándose en el hospital de su séptima herida causada por un rayo, con una expresión de temor y desconcierto en su cara). Lo único milagroso acerca de mi hipotética historia es la *coincidencia* entre el hecho de que yo sea fulminado por un rayo y mi invocación verbal del desastre.

La coincidencia significa multiplicar la improbabilidad. La probabilidad de que yo sea fulminado por un rayo en cualquier minuto de mi vida es quizá de uno en 10 millones, como estimación conservadora. La probabilidad de que yo invoque el ser fulminado por un rayo en cualquier minuto en particular es también muy pequeña. Lo he hecho sólo una vez en los 23 400 000 minutos que llevo de vida, y dudo que lo haga otra vez, de manera que cifraremos esta probabilidad en uno en 25 millones. Para calcular la probabilidad conjunta de que se produzca la coincidencia de ambas en un minuto cualquiera multiplicaremos las dos probabilidades por separado. Por mis cálculos aproximados, viene a ser alrededor de uno en 250 billones. Si me sucediese una coincidencia de esta magnitud, lo llamaría un milagro y cuidaría mi lenguaje en el futuro. Pero aunque las probabilidades en contra de que se produzca esta coincidencia son harto elevadas, todavía podemos calcularlas. No son literalmente cero.

En el caso de la estatua de mármol, las moléculas en el mármol sólido están chocando entre sí en direcciones aleatorias. Los choques de las diferentes moléculas se anulan entre sí, de forma que la mano de la estatua permanece inmóvil. Pero si ocurriese, por pura coincidencia, que todas las moléculas se moviesen en la misma dirección y al mismo tiempo, la mano se movería. Si invirtieran entonces su dirección en el mismo momento, la mano se movería hacia atrás. De esta manera, es *posible* que una estatua de mármol agite su mano hacia nosotros. Podría su-

ceder. Las probabilidades contra tal coincidencia son inimaginablemente grandes pero no incalculablemente grandes. Un colega físico las ha calculado amablemente para mí. ¡El número es tan grande que la edad del universo hasta el presente sería un tiempo demasiado corto para escribir todos los ceros! En teoría, es posible que una vaca salte hasta la Luna con algo así como la misma improbabilidad. La conclusión para esta parte del argumento es que podemos *calcular* nuestro camino hacia regiones de improbabilidad milagrosa mucho más grandes que lo que podemos *imaginar* como plausible.

Consideremos ese tema de qué pensamos que es plausible. Lo que podemos imaginar como plausible es una estrecha banda en medio de un espectro mucho más amplio de lo que es realmente posible. Algunas veces, es más estrecha de lo que hay realmente allí. Existe una buena analogía con la luz. Nuestros ojos están construidos para cubrir una estrecha banda de frecuencias electromagnéticas (a las que llamamos luz), situadas en algún lugar en medio del espectro, que va desde las ondas de radio con una longitud amplia en un extremo hasta los rayos X con una longitud corta en el otro. No podemos ver los rayos situados fuera de la estrecha banda luminosa, pero podemos hacer cálculos sobre ellos y construir instrumentos para detectarlos. De la misma forma, sabemos que las escalas de tamaño y tiempo se extienden en ambas direcciones mucho más allá del campo que podemos visualizar. Nuestras mentes no pueden hacer frente a las largas distancias con las que trata la astronomía o las pequeñas distancias con las que trata la física atómica, pero podemos representarlas con símbolos matemáticos. Nuestras mentes no pueden imaginar un período de tiempo tan corto como un picosegundo, pero podemos construir ordenadores que pueden completar cálculos en picosegundos. Nuestras mentes no pueden imaginar un período de tiempo tan largo como un millón de años, dejando aparte los miles de millones de años que los geólogos utilizan a diario en sus cálculos.

Así como nuestros ojos sólo pueden ver esta estrecha banda de frecuencias electromagnéticas gracias a que la selección natural equipó a nuestros antepasados para verla, así nuestros cerebros están construidos para cubrir estrechas bandas de tamaños y tiempos. Presumiblemente, nuestros antepasados no tenían necesidad de hacer frente a los tamaños y tiempos fuera del estrecho rango de la práctica diaria, de forma que nuestros cerebros nunca desarrollaron la capacidad evolutiva de imaginarlos. Es significativo que el tamaño de nuestro propio cuerpo, de algo más de un metro de altura, esté más o menos en la parte media del intervalo de tamaños que podemos imaginar. Y nuestra propia vida, de unas pocas décadas de duración, está en la parte media del intervalo de tiempo que podemos imaginar.

Podemos decir lo mismo de las improbabilidades y los milagros. Dibujemos un escala graduada de improbabilidades, análoga a la escala de tamaños entre los átomos y las galaxias, o a la escala de tiempos desde los picosegundos a los eones. En la escala haremos varias marcas. En el extremo lejano de la izquierda de la escala estarían los sucesos que son del todo ciertos, como la probabilidad de que el sol salga mañana, objeto de la apuesta de medio penique de G. H. Hardy. Cerca de este extremo izquierdo de la escala hay cosas que son apenas improbables, como sacar un doble seis arrojando al alto un par de dados una sola vez. La probabilidad de que esto ocurra es de 1 en 36. Espero que lo hayamos hecho todos con bastante frecuencia. Moviéndonos hacia el extremo derecho del espectro, otra marca sería la probabilidad de una mano perfecta en el bridge, donde cada uno de los cuatro jugadores recibe un juego completo de cartas. Las probabilidades en contra de que esto ocurra son de 2 235 197 406 895 366 368 301 599 999 a 1. Llamemos a esto un dealion, la unidad de improbabilidad. Si algo con una probabilidad de un dealion se predice y ocurre deberíamos diagnosticar un milagro, a menos que, lo cual es más probable, sospechemos un fraude. Pero podría ocurrir con una buena mano, y sería mucho pero mucho más probable que el hecho de que la estatua de mármol agitase su mano hacia nosotros. Sin embargo, incluso este último suceso, como hemos visto, tiene su lugar apropiado en el espectro de sucesos que podrían ocurrir. Es mensurable, aunque en unidades mucho más grandes que los gigadealions. Entre el doble seis de la tirada de dados, y la mano perfecta en el bridge, hay un intervalo de sucesos más o menos improbables que ocurren a veces, incluyendo que un individuo cualquiera sea fulminado por un rayo, gane un gran premio en las quinielas de fútbol, introduzca la bola en un agujero de un solo tiro al golf, y así sucesivamente. En algún lugar de este intervalo, están también aquellas coincidencias que nos producen una misteriosa sensación de escalofrío, como soñar con una persona determinada por primera vez en décadas, despertarse luego y encontrar que murió durante la noche. Estas misteriosas coincidencias son muy impresionantes cuando nos suceden a nosotros o a uno de nuestros amigos, pero su improbabilidad se mide sólo en picodealions.

Después de haber construido nuestra escala matemática de improbabilidades, con sus marcas señaladas, volvamos ahora a proyectarnos sobre ese subrango de la escala con el que podemos enfrentamos en nuestros pensamientos y conversaciones or-

dinarias. La anchura del haz proyectado es análoga al estrecho rango de las frecuencias electromagnéticas que pueden ver nuestros ojos, o al estrecho rango de tamaños y tiempos, cercanos a nuestro propio tamaño y longevidad, más de lo que podemos imaginar. En el espectro de improbabilidades, el proyector ilumina sólo un intervalo estrecho desde la parte final del extremo izquierdo (certeza) hasta los pequeños milagros, como un agujero en un solo tiro o un sueño que se vuelve realidad. Hay un vasto rango de improbabilidades que pueden calcularse matemáticamente fuera del rango del proyector.

Nuestros cerebros han sido construidos por la selección natural para evaluar la probabilidad y el riesgo, del mismo modo que nuestros ojos han sido construidos para evaluar las longitudes de onda electromagnéticas. Estamos equipados para hacer cálculos mentales de riesgo y probabilidades, dentro del rango de improbabilidades que serían útiles en la vida humana. Esto significa riesgos del orden de, digamos, ser corneado por un búfalo, si le disparamos una flecha, ser fulminado por un rayo, si buscamos refugio bajo un árbol solitario en una tormenta, o ahogarnos, si tratamos de cruzar un río a nado. Estos riesgos aceptables están conmensurados con la duración de nuestra vida de unas pocas décadas. Si fuésemos biológicamente capaces de vivir un millón de años, y quisiéramos hacerlo, evaluaríamos los riesgos de una manera diferente. Deberíamos acostumbrarnos, por ejemplo, a no cruzar las carreteras, porque si uno cruza una carretera cada día durante medio millón de años, indudablemente será atropellado.

La evolución ha equipado nuestros cerebros con una conciencia subjetiva de riesgo e improbabilidad, adecuada para criaturas con una vida de una duración inferior a un siglo. Nuestros antepasados sintieron la necesidad de tomar decisiones que implicaban riesgos y probabilidades, y la selección natural, por tanto, ha equipado nuestros cerebros para evaluar probabilidades sobre el trasfondo de la corta duración de la vida que podemos esperar. Si en algún planeta hubiera seres con una expectativa de vida de un millón de siglos, su proyección de los riesgos comprensibles se extendería mucho más lejos, hacia el extremo derecho del espectro continuo. Esperarían tener una mano de bridge perfecta de vez en cuando, y apenas si se molestarían en escribir a casa cuando eso ocurriera. Pero se acobardarían si una estatua de mármol les agitase una mano, porque hay que vivir dealions de años más, incluso, de lo que ellos viven, para presenciar un milagro de esta magnitud.

¿Qué tiene que ver todo esto con las teorías sobre el origen de la vida? Bien, comenzamos este argumento con la premisa

de que la teoría de Cairns-Smith y la del caldo primitivo nos sonaban un poco forzadas e improbables. Nos sentimos inclinados a rechazarlas. Pero «nosotros», recordémoslo, somos seres con unos cerebros equipados con un proyector de riesgo comprensible, con un haz del tamaño de un lápiz que ilumina el extremo izquierdo del espectro matemático continuo de los riesgos calculables. Nuestro juicio subjetivo de lo que parece ser una buena apuesta es irrelevante para lo que es, en realidad, una buena apuesta. El juicio subjetivo de un extraño con una vida de una duración de millones de siglos sería bastante diferente. Él juzgaría bastante plausible un suceso como el origen de la primera molécula duplicadora, según está postulado en las teorías de algunos químicos, suceso que nosotros, equipados por la evolución para movernos en un mundo de unas pocas décadas de duración, juzgaríamos un milagro asombroso. ¿Cómo podemos decir qué punto de vista es el correcto, el nuestro o el del extraño de larga vida?

Hay una respuesta simple a esta cuestión. El punto de vista del extraño de larga vida sería el correcto, mirando a la credibilidad de una teoría como la de Cairns-Smith o la del caldo primitivo. Es porque estas dos teorías postulan un suceso en particular —el origen espontáneo de una entidad que se replica a sí misma— que ocurre una sola vez en cerca de mil millones de años, una vez por eón. Un eón y medio es más o menos el tiempo transcurrido entre el origen de la Tierra y los primeros fósiles parecidos a bacterias. Para nuestro cerebro consciente de las décadas, un suceso que ocurre sólo una vez por eón es tan raro que parece un gran milagro. Para el extraño longevo, parecerá menos un milagro de lo que nos parece a nosotros introducir una pelota de golf de un solo tiro, y la mayor parte de nosotros probablemente conocemos a alguien que conoce a alguien que ha conseguido marcar un agujero de un solo tiro. Juzgando las teorías sobre el origen de la vida, la escala de tiempo subjetiva del extraño longevo es la única relevante, porque es aproximadamente la escala de tiempo implicada en el origen de la vida. Nuestro propio juicio subjetivo sobre la credibilidad de una teoría sobre el origen de la vida es probable que sea erróneo por un factor de cien millones.

De hecho, nuestro juicio subjetivo puede resultar erróneo incluso con un margen superior. Nuestros cerebros no sólo están equipados por la naturaleza para evaluar los riesgos de las cosas en un corto plazo de tiempo, sino que también están equipados para evaluar los riesgos de las cosas que nos suceden personalmente a nosotros, o al estrecho círculo de personas que conocemos. Es así porque nuestros cerebros no evolucionaron bajo

condiciones dominadas por los medios de comunicación. La comunicación de masas significa que si a alguien le ocurre una cosa improbable, en cualquier parte del mundo, lo leeremos en nuestros periódicos o en el *Guinness Book of Records*. Si un orador, en cualquier parte del mundo, desafiase en público al rayo para que le fulminase si estuviera mintiendo, y sucediese, lo leeríamos y nos quedaríamos bastante impresionados. Pero hay varios miles de millones de personas en el mundo a quienes *podría* ocurrirles algo así, de forma que esta aparente coincidencia no es, en realidad, tan grande como parece. Nuestros cerebros están probablemente equipados por la naturaleza para evaluar los riesgos de las cosas que nos suceden a nosotros, o a unos pocos cientos de personas en un pequeño círculo de pueblos al alcance de un tam-tam de los que nuestros antepasados tribales podían esperar recibir noticias. Cuando leemos en un periódico algo sobre una coincidencia divertida que le ha ocurrido a alguien en Valparaíso o en Virginia, nos impresionamos más de lo que deberíamos. Nos impresionamos más por un factor de, quizá, cien millones, si es ésta la relación entre la población mundial examinada por nuestro periódico, y la población tribal sobre la cual nuestros cerebros evolucionados «esperarían» recibir noticias.

Este «cálculo de población» es también relevante para nuestro juicio sobre la credibilidad de las teorías sobre el origen de la vida. No a causa de la población que hay en la Tierra, de la población de planetas en el universo, donde *podría* haberse originado la vida. Es un argumento que nos encontramos ya en este capítulo, de forma que no es necesario entretenerse. Volvamos a nuestro dibujo mental de una escala graduada de sucesos improbables, con las marcas que coinciden con una mano de bridge y una tirada de dados. En esta escala graduada de dealions y microdealions, hay que marcar los tres puntos siguientes. Probabilidad de que se origine vida en un planeta (en digamos mil millones de años), si asumimos que la vida se originó a un ritmo de alrededor de una vez por sistema solar. Probabilidad de que la vida se origine en un planeta, si la vida se originó a un ritmo de alrededor de una vez por galaxia. Probabilidad de que exista vida en un planeta seleccionado al azar, si la vida se originó sólo una vez en el universo. Identificaremos estos tres puntos como el Número del Sistema Solar, el Número de la Galaxia y el Número del Universo, respectivamente. Hay que recordar que hay alrededor de 10 000 millones de galaxias. No sabemos cuántos sistemas solares hay en cada galaxia porque sólo podemos ver estrellas, no planetas, pero utilizamos antes una estimación de que en el universo podría haber 100 trillones de planetas.

Cuando evaluamos la improbabilidad de un suceso postulado, por ejemplo, por la teoría de Cairns-Smith, deberíamos evaluarla, no contra lo que pensamos subjetivamente como probable o improbable, sino contra números como estos tres: el Número del Sistema Solar, el Número de la Galaxia y el Número del Universo. Cuál de estos tres números es el más apropiado depende de cuál de las tres afirmaciones siguientes pensemos que está más cerca de la verdad:

1. La vida se ha originado en un solo planeta en todo el universo (y este planeta, como vimos antes, tiene que ser la Tierra).
2. La vida se ha originado en un solo planeta por galaxia (en nuestra galaxia, la Tierra es el planeta afortunado).
3. El origen de la vida es un suceso lo suficientemente probable como para que se haya originado una vez por sistema solar (en nuestro sistema solar, la Tierra sería el planeta afortunado).

Estas tres manifestaciones representan tres puntos de vista sobre lo extraordinaria que puede ser la vida. La rareza real de la vida descansa probablemente en algún punto entre los extremos presentados por la primera y la tercera afirmación. ¿Por qué digo esto? ¿Por qué razón deberíamos descartar una cuarta posibilidad: que el origen de la vida sea un suceso mucho *más* probable de lo que sugiere la tercera declaración? No es un buen argumento pero, por si acaso, funciona así: si el origen de la vida fuese un suceso mucho más probable de lo que sugiere el Número del Sistema Solar esperaríamos, en estos momentos, haber encontrado vida extraterrestre, si no en carne y hueso (o cualquier cosa que sea equivalente), por lo menos, por radio.

Con frecuencia, se dice que los químicos no han conseguido en sus intentos duplicar el origen espontáneo de la vida en el laboratorio. Este hecho se utiliza como si constituyese una evidencia contra las teorías que esos químicos están tratando de probar. Pero se podría discutir que lo que nos debería preocupar es que resultase muy fácil para los químicos obtener vida de una manera espontánea en un tubo de ensayo. Porque los experimentos de los químicos duran años, no miles de millones de años, y porque sólo un puñado de químicos, no miles de millones de químicos, están empeñados en lograrlo. Si el origen espontáneo de la vida resultó ser un suceso lo bastante probable como para haber ocurrido durante las escasas décadas humanas en las que los químicos han hecho sus experimentos, en-

tonces la vida debería haberse originado varias veces en la Tierra, y muchas veces en los planetas dentro del rango de las ondas de radio de la Tierra. Por supuesto, todo esto origina importantes cuestiones sobre si los químicos consiguieron duplicar las condiciones de la Tierra primitiva pero, incluso así, ya que no tenemos respuesta a estas preguntas, merece la pena seguir con nuestro argumento.

Si el origen de la vida fue un suceso probable para estándares humanos ordinarios, habría entonces un número sustancial de planetas dentro del rango de las ondas de radio que deberían haber desarrollado una radiotecnología hace ya tiempo (teniendo en cuenta que las ondas de radio viajan a 300 000 kilómetros por segundo) como para que nosotros hubiésemos captado, por lo menos, una transmisión durante las décadas en las que hemos estado preparados para hacerlo. Hay, probablemente, alrededor de 50 estrellas dentro del rango de estas ondas de radio, si asumimos que han tenido radiotecnología sólo durante el tiempo que la hemos tenido nosotros. Pero 50 años constituyen un instante efímero, y sería mucha coincidencia que otra civilización estuviese en un estadio tan cercano a la nuestra. Si abarcáramos con nuestros cálculos aquellas civilizaciones que hubiesen tenido radiotecnología hace 1 000 años, habría algo así como un millón de estrellas en el rango de las ondas de radio (junto con la cantidad de planetas que estuvieran girando alrededor de cada una de ellas). Si incluimos aquellas cuya radiotecnología se remonte a 100 000 años, la galaxia entera de billones de estrellas estaría dentro del rango de las ondas de radio. Por supuesto, las señales emitidas se irían atenuando bastante a lo largo de estas enormes distancias.

Así pues, hemos llegado a la siguiente paradoja. Si una teoría sobre el origen de la vida es lo bastante «creíble» como para satisfacer nuestro juicio subjetivo de credibilidad, entonces sería *demasiado* «creíble» para justificar la escasez de vida en el universo tal como lo observamos. De acuerdo con este argumento, la teoría que estamos buscando *tiene* que ser una teoría que parezca increíble a nuestra imaginación limitada, ligada a la Tierra, ligada a las décadas. A la luz de esto, tanto la teoría de Cairns-Smith como la del caldo primitivo, si en algo parecen peligrar ¡es porque pecan de ser demasiado creíbles! Después de haber dicho todo esto debo confesar que, debido a que existe una gran incertidumbre en los cálculos, si un químico *consiguiera* crear vida de forma espontánea, realmente no me sentiría desconcertado.

Aún no sabemos con exactitud cómo empezó la selección natural en la Tierra. Este capítulo ha tenido la modesta finali-

dad de explicar sólo la manera en la que pudo haber ocurrido. La falta, en la actualidad, de una explicación sobre el origen de la vida, que esté definitivamente aceptada, no debería interpretarse como un escollo para una visión completa del mundo darwiniano, como ocasionalmente –tal vez con un pensamiento voluntarioso– lo es. En los capítulos anteriores se han discutido otros posibles escollos, y en el próximo se abordará uno más: la idea de que la selección natural sólo puede destruir, nunca construir.

7. LA EVOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

A veces, la gente piensa que la selección natural es una fuerza puramente negativa, capaz de eliminar las monstruosidades y los fallos, pero incapaz de construir un diseño complejo, bello y eficiente. No hace sino sustraer de lo que ya hay allí, pero un proceso en verdad creativo ¿no debería, también, añadir algo? Podemos contestar, en parte, con el ejemplo de una estatua. No se añade nada al bloque de mármol. El escultor sólo quita; sin embargo, emerge una bella estatua. Aunque esta metáfora puede despistar, ya que algunas personas pueden ver el lado erróneo de la misma –el hecho de que el escultor sea un diseñador consciente– y pasar por alto la parte importante: el hecho de que el escultor trabaja quitando, más que añadiendo. Incluso esta parte de la metáfora no debería llevarse demasiado lejos. La selección natural solo puede quitar, pero las mutaciones pueden añadir. Hay maneras en las que la actuación conjunta de ambas puede conducir, a lo largo de un prolongado intervalo de tiempo geológico, a la construcción de una complejidad que tiene más cosas en común con la suma que con la resta. Hay dos formas en las que puede ocurrir esta construcción. La primera recibe el nombre de «genotipos coadaptados»; la segunda, el de «carrera de armamentos». Las dos son, superficialmente, bastante diferentes una de otra, pero están unidas bajo los títulos de «coevolución» y «genes que actúan como medio ambiente de otro».

En primer lugar, la idea de «genotipos coadaptados». Un gen tiene la particularidad de que funciona *sólo* porque existe una estructura sobre la que actuar. Un gen no puede afectar a las conexiones cerebrales, a menos que haya un cerebro que pueda ser conectado en primer lugar. Y no habrá un cerebro así, a menos que haya todo un embrión en desarrollo. Y no habrá un embrión en desarrollo, a menos que haya un programa completo de actuaciones químicas y celulares, bajo la influencia de muchas otras influencias causales, no genéticas. Los efectos determinados que tienen los genes no son propiedades intrínsecas de los mismos. Son propiedades de los procesos embriológicos *existentes*, cuyos detalles pueden ser *cambiados* por los genes, actuando en unos lugares concretos en unos momentos determinados, durante el desarrollo embrionario. Vimos este mensaje demostrado de una forma elemental, durante el desarrollo de las bioformas en el ordenador.

En cierto sentido, podemos considerar el proceso de desarrollo embrionario como un proyecto en cooperación, dirigido conjuntamente por miles de genes. Los embriones son construidos por todos los genes funcionantes del organismo en desarrollo, actuando en estrecha colaboración. He aquí la clave para comprender cómo se estableció esta colaboración. En el proceso de selección natural, los genes son seleccionados siempre por su capacidad de prosperar en el ambiente en que se encuentran. Con frecuencia, identificamos ese ambiente con el mundo exterior, el mundo de los depredadores y de los cambios climáticos. Pero desde el punto de vista de cada gen, la parte ambiental más importante quizá sean *los otros genes con los que se encuentra*. ¿Dónde «se encuentra» un gen con otros genes? En especial, en las células de los cuerpos de los individuos a los que se va transmitiendo sucesivamente. Cada gen es seleccionado por su capacidad de cooperar con éxito con las poblaciones de otros genes, que es probable que encuentren en estos cuerpos. La población de genes, que constituyen el verdadero ambiente de trabajo de un gen determinado, no es sólo la colección temporal que se reúne en las células del cuerpo de un individuo determinado. Por lo menos en las especies que se reproducen sexualmente, es el conjunto de todos los genes de la población de todos los individuos que se han cruzado entre sí: el «*pool*» de genes. En un momento dado, cualquier copia de un gen concreto, en el sentido de un conjunto de átomos determinado, debe estar asentada en una célula de un individuo. Pero el conjunto de átomos que constituye una copia de un gen no tiene un interés permanente. Tiene una expectativa de vida que se mide sólo en meses. Como hemos visto, el gen de larga vida como unidad evolutiva no tiene una estructura física concreta; excepto la *información* textual archivada, copiada en el transcurso de las generaciones. Esta copiadora de textos tiene una existencia distribuida. Está distribuida ampliamente en el espacio entre distintos individuos, y en el tiempo, a lo largo de muchas generaciones. Cuando se contempla bajo este punto de vista, puede decirse que cualquier gen «se encuentra» con otro cuan-

do se encuentran compartiendo un cuerpo. Puede «esperar» encontrarse una gran variedad de genes en diferentes cuerpos y en diferentes momentos de su existencia distribuida, durante su paso a través del tiempo geológico. Un gen próspero será aquel que funcione bien en los ambientes suministrados por los otros genes, que es probable que encuentre en muchos cuerpos diferentes. «Funcionar bien» en tales ambientes resulta equivalente a «colaborar» con estos otros genes. Esto se ve mejor en el caso de las reacciones bioquímicas.

Las reacciones químicas son secuencias de sustancias químicas que constituyen estadios sucesivos de algún proceso útil, como la liberación de energía o la síntesis de una sustancia importante. Cada paso en una reacción necesita una enzima, una de esas grandes moléculas diseñadas para trabajar como una máquina en una factoría química. Se necesitan diferentes enzimas para los distintos pasos de una reacción química. Algunas veces hay dos, o más, reacciones químicas alternativas, que conducen a un mismo fin igualmente útil. Aunque las dos produzcan un resultado final idéntico, tienen estadios intermedios diferentes y, por lo general, puntos de partida distintos. Cualquiera de las dos reacciones cumplirá la función, sin importar cuál de ellas se utilice. Lo importante para un animal determinado es tratar de evitar que ambas reacciones funcionen a la vez, porque ello daría como resultado una confusión química, y la correspondiente ineficacia.

Supongamos ahora que la reacción 1 necesita la actuación sucesiva de las enzimas A1, B1 y C1, para sintetizar el producto químico deseado D, mientras que la reacción 2 necesita la de las enzimas A2, B2 y C2 para llegar al mismo producto final. Cada enzima está fabricada por un gen determinado. Así pues, para que evolucione la línea de montaje de la reacción 1, cualquier especie necesitaría que los genes que codifican A1, B1 y C1 *co*evolucionasen todos juntos. Para que evolucione la línea de montaje alternativa de la reacción 2, necesitaría que los genes que codifican A2, B2 y C2 coevolucionasen unos con otros. La elección entre estas dos coevoluciones no se produce a través de una planificación previa. Se produce a través de la selección de cada gen, en virtud de su compatibilidad con los genes *que predominan en la población*. Si la población es rica en genes que codifican B1 y C1, se establecerá un ambiente que favorecerá más al gen que codifica A1 que al que codifica A2. Si, por el contrario, abundan los genes que codifican B2 y C2, se establecerá un ambiente en el que se favorecerá más la selección de los genes que codifican A2 que los que codifican A1.

Es probable que no sea tan simple, pero nos hacemos una

idea: uno de los aspectos más importantes del «ambiente» que favorece, o no, a un gen, son los demás genes que ya son numerosos en la población; los otros genes, por tanto, con los que es probable que tenga que compartir cuerpos. Como lo mismo será cierto para estos «otros» genes, tendremos un cuadro de equipos de genes evolucionando en cooperación hacia soluciones frente a los distintos problemas. Los propios genes no evolucionan, sólo sobreviven o no en el «pool» de genes. Es el «equipo» el que evoluciona. Otros equipos podían haber hecho el trabajo igual de bien, o incluso mejor. Pero una vez que el equipo comienza a dominar el «pool» de genes de una especie, tiene una ventaja automática. Para un grupo minoritario resulta difícil forzar su entrada; incluso para un equipo que, al final, hubiese hecho el trabajo de manera más eficiente. El equipo mayoritario presenta una resistencia automática a ser desplazado, simplemente en virtud de su mayoría. Esto no significa que no pueda ser desplazado nunca. Si así ocurriera, la evolución habría llegado a un punto muerto. Significa que hay un cierto tipo de inercia inherente.

Obviamente, esta clase de argumentos no se limita a la bioquímica. Podríamos establecer lo mismo para grupos de genes compatibles que construyen las diferentes partes de los ojos, orejas, narices, extremidades, todas aquellas partes que precisan cooperación en el cuerpo de un animal. Los genes que hacen que los dientes sean adecuados para masticar carne tenderán a ser favorecidos en un «ambiente» dominado por genes que hacen que el intestino sea adecuado para digerir carne. Por el contrario, los genes que producen dientes para triturar vegetales tenderán a ser favorecidos en un ambiente dominado por genes que hacen que el intestino sea adecuado para digerir vegetales. Y lo contrario en ambos casos. Los equipos de «genes comedores de carne» y los equipos de «genes comedores de vegetales» tenderán a evolucionar juntos. Por supuesto, hay un cierto sentido en el que podría decirse que la mayoría de los genes funcionantes de un cuerpo cooperan entre sí, como un equipo, porque a lo largo del tiempo evolutivo (sus propias copias ancestrales) han sido parte de un medio ambiente en el que la selección natural actuó sobre los otros. Si preguntamos por qué los antepasados de los leones escogieron comer carne, mientras que los antepasados de los antílopes escogieron comer hierba, la respuesta podría ser que, originalmente, fue un accidente. Un accidente, en el sentido de que podrían haber sido los antepasados de los leones los que hubieran escogido comer hierba, y los de los antílopes los que hubieran escogido comer carne. Pero una vez que su descendencia *comenzó* a formar un equipo de genes para

procesar carne en vez de hierba, el proceso se fue reforzando a sí mismo. Y una vez que la otra descendencia comenzó a formar un equipo de genes para procesar hierba en vez de carne, este proceso también se fue reforzando a sí mismo pero en otra dirección.

Una de las principales cosas que debieron de ocurrir en la evolución temprana de los organismos vivos fue un aumento en el número de genes participantes en tales cooperativas. Las bacterias tienen muchos menos genes que los animales y las plantas. El incremento debe de haberse producido a través de varios tipos de duplicación genética. Hay que recordar que un gen es, simplemente, un fragmento de símbolos codificados, como un archivo en un disco de un ordenador; y que pueden copiarse en diferentes partes de los cromosomas como los archivos pueden hacerlo en diferentes partes del disco. En el disco que contiene este capítulo hay oficialmente tres archivos. Por «oficialmente» quiero significar que el sistema operativo del ordenador me dice que sólo hay tres archivos. Puedo pedir que lea uno de los tres, y me lo presente con una disposición unidimensional de caracteres alfabéticos, incluyendo los caracteres que se están leyendo en ese momento. Todo con una apariencia muy pulcra y ordenada. Pero, de hecho, la disposición del texto en el propio disco no es pulcra ni ordenada. Puede verse mejor si uno escapa de la disciplina del sistema operativo oficial del ordenador, y escribe su propio programa para descifrar lo que está escrito en ese momento en cada sector del disco. Resulta que hay fragmentos esparcidos de cada uno de mis tres archivos, entremezclados con fragmentos de viejos archivos, inutilizados, que borré hace tiempo y que había olvidado. Cualquier fragmento puede salir igual, palabra por palabra, o con pequeñas diferencias, en media docena de sitios diferentes en el disco.

El motivo es interesante, y merece una desviación del tema principal, porque facilita una buena analogía genética. Cuando se le indica a un ordenador que elimine un archivo, parece obedecer. Pero, en realidad, no borra el texto de ese archivo. Sólo borra todos los punteros. Es como si un bibliotecario, al que se le ha ordenado destruir el libro de *El amante de Lady Chatterley*, rompiera sólo la ficha del fichero. Para el ordenador es una forma económica de hacer las cosas, porque el espacio ocupado por el archivo «borrado» queda automáticamente disponible para registrar nuevos archivos, tan pronto como se eliminan sus punteros. Sería una pérdida de tiempo molestarse en rellenar el espacio con blancos. El archivo antiguo no se habrá perdido, por tanto, hasta que todo su espacio haya sido utilizado para almacenar nuevos ficheros.

Pero esta reutilización de espacios se produce en fragmentos. Los nuevos archivos no son exactamente del mismo tamaño que los antiguos. Cuando el ordenador trata de almacenar un archivo nuevo en un disco, busca el primer espacio disponible, escribe tanto como quepa, luego busca otro espacio disponible, escribe un poco más, y así sucesivamente, hasta que el archivo queda escrito *en alguna parte* del disco. La persona tiene la ilusión de que el archivo es único, dispuesto ordenadamente, sólo porque el ordenador tiene el cuidado de guardar registros, donde están «apuntadas» las direcciones de todos los fragmentos dispersos. Estos «punteros» son como las indicaciones de «continúa en la página 94», utilizadas por el *New York Times*. La razón por la que encontramos muchas copias de cualquier fragmento de texto en un disco es que, si ha sido editado y reeditado muchas docenas de veces, como todos mis capítulos, cada edición dará como resultado una nueva grabación de (casi) el mismo texto. La grabación puede ser ostensiblemente una grabación del mismo archivo. Pero, como hemos visto, el texto, de hecho, será esparcido repetidamente por los «espacios» disponibles del disco. De aquí que puedan encontrarse múltiples copias de un fragmento determinado de texto por toda la superficie del disco, y más si el disco es viejo y está muy utilizado.

El sistema operativo del DNA de una especie es muy antiguo, y existen pruebas de que, a largo plazo, se comporta un poco como el ordenador con los archivos de sus discos. Parte de esta evidencia procede del fenómeno fascinante de los «intrones» y «exones». En la última década, se ha descubierto que cualquier gen «único», en el sentido de un pasaje de DNA único, leído de una forma continuada, no está todo almacenado en un sitio. En realidad, si se leen las letras de los códigos según se van produciendo a lo largo del cromosoma (si se realiza el equivalente a abandonar la disciplina del sistema operativo), se encuentran fragmentos con «sentido», llamados exones, separados por otros «sin sentido», llamados intrones. Cualquier «gen» único en sentido funcional, está dividido en una secuencia de fragmentos (exones) separados por intrones que no tienen ningún significado. Es como si cada exón terminase con un puntero que dijese «continúa en la página 94». Así pues, un gen completo está formado por una serie completa de exones, que, en realidad, sólo están unidos cuando son leídos eventualmente por el sistema operativo «oficial» que los traduce en proteínas.

Una prueba adicional procede del hecho de que los cromosomas están cubiertos de fragmentos genéticos antiguos que ya no se utilizan, pero que todavía pueden ser reconocidos. Para un programador de ordenadores, el patrón de distribución de

estos fragmentos de «fósiles genéticos» muestra una extraña reminiscencia con el de un disco antiguo que se ha utilizado mucho para editar textos. En algunos animales, una elevada proporción del número total de genes no se lee nunca. Son genes que no tienen ningún sentido, «genes fósiles» obsoletos.

En ocasiones, los textos fósiles aparecen de nuevo, como lo experimenté escribiendo este libro. Un error del ordenador (o, para ser justo, pudo haber sido un error humano) fue la causa de que se me «borrara» el disco que contenía el capítulo 3. Por supuesto, el texto no había sido borrado en su totalidad. Lo que se había borrado definitivamente eran los *punteros* que indicaban dónde comenzaba y acababa cada «exón». El sistema operativo «oficial» no podía leer nada, pero «extraoficialmente» pude jugar el papel de ingeniero genético y examinar todo el texto en el disco. Lo que vi fue un desconcertante rompecabezas de fragmentos de texto, algunos recientes, otros antiguos «fósiles». Reuniendo los fragmentos del rompecabezas, fui capaz de volver a crear el capítulo. Pero en conjunto no sabía qué fragmentos eran recientes y cuáles fósiles. No importó porque, aparte de pequeños detalles que necesitaron algunas correcciones, eran los mismos. Por lo menos algunos de los «fósiles», o «intrones» obsoletos, habían vuelto a aparecer. Me rescataron de mi apuro, y me ahorraron la molestia de tener que volver a escribir todo el capítulo.

Existe cierta evidencia de que, también en las especies vivas, los «genes fósiles» vuelven a aparecer, y vuelven a utilizarse después de permanecer dormidos durante un millón de años, más o menos. Entrar en detalles nos alejaría mucho de la dirección general de este capítulo, ya que se recordará que estamos todavía en una divagación fuera del tema. El punto principal era que la capacidad genética de una especie se puede incrementar mediante una duplicación de sus genes. La reutilización de copias de viejos «fósiles» de genes que ya existen es una manera posible. Hay otras, más inmediatas, mediante las cuales los genes pueden ser copiados en zonas ampliamente distribuidas de los cromosomas, como archivos que están siendo duplicados en distintas partes de un disco, o de discos diferentes.

Los seres humanos tenemos ocho genes separados, denominados genes de la globina (que se utilizan, entre otras cosas, para fabricar la hemoglobina), en distintos cromosomas. Parece cierto que los ocho han sido copiados, en último extremo, a partir de un gen ancestral único. Hace unos 1 100 millones de años, este gen se duplicó, dando lugar a dos genes. Podemos fechar este suceso gracias a la evidencia independiente que suministra la velocidad a la que evolucionan las globinas habitualmente

(véanse los capítulos 5 y 11). De los dos genes producidos en esta duplicación original, uno se transformó en el antepasado de todos los genes que producen hemoglobina en los vertebrados. El otro, en el antepasado de todos los genes que producen mioglobina, una familia de proteínas relacionada con la hemoglobina, localizada en los músculos. Varias duplicaciones posteriores dieron lugar a las llamadas globinas alfa, beta, gamma, delta, épsilon y zeta. Lo fascinante es que podemos construir un árbol genealógico completo de los genes de la globina, e incluso poner fechas en todos los puntos de divergencia (las globinas delta y beta, por ejemplo, se separaron juntas hace 40 millones de años; las globinas épsilon y gamma hace 100 millones de años). Las ocho globinas, descendientes de estas ramificaciones producidas en antepasados lejanos, están todavía presentes en cada uno de nosotros. Divergieron en distintas partes de los cromosomas de nuestros antepasados, y cada uno de nosotros las hemos heredado en diferentes cromosomas. Las moléculas comparten el mismo cuerpo con sus remotos primos moleculares. Es indudable que una gran proporción de esta duplicación tuvo lugar, en todos los cromosomas, a lo largo del tiempo geológico. Éste es un aspecto importante en el que la vida real es más compleja que las bioformas del capítulo 3. Éstas tenían sólo nueve genes. Evolucionaron mediante cambios en los nueve genes, sin aumentar nunca su número a diez. Incluso en animales reales, estas duplicaciones son lo suficientemente raras como para no invalidar mi afirmación general, de que todos los miembros de una especie comparten el mismo sistema de «direcciones» del DNA.

La duplicación dentro de una especie no es el único mecanismo por el que ha aumentado el número de genes que cooperan durante la evolución. Un caso aún más raro, pero probablemente muy importante, es la incorporación ocasional de un gen de otra especie. Por ejemplo, hay hemoglobinas en las raíces de las plantas de la familia del guisante. No se producen en ninguna otra familia de plantas, y parece casi cierto que entraron en la familia de los guisantes por una infección cruzada a partir de los animales, actuando, quizá, los virus como intermediarios.

Un suceso especialmente importante a lo largo de esta línea, de acuerdo con la teoría cada vez más favorecida de la bióloga americana Lynn Margulis, tuvo lugar en el origen de la llamada célula eucariota. Las células eucariotas incluyen todas las células excepto las bacterias. El mundo vivo está dividido, fundamentalmente, en bacterias y el resto. Nosotros somos parte del resto, y se nos denomina, en conjunto, eucariotas. Nos diferen-

ciamos de las bacterias, en especial, en que nuestras células tienen discretas minicélulas en su interior. Éstas incluyen el núcleo, que alberga los cromosomas, los diminutos objetos con forma de proyectil, llamados mitocondrias (que encontramos brevemente en la figura 1), llenos de intrincados pliegues de membranas; y en las células (eucariotas) de las plantas, los cloroplastos. Las mitocondrias y los cloroplastos tienen su propio DNA, que se duplica y propaga por sí solo, con entera independencia del DNA principal de los cromosomas del núcleo. Las mitocondrias de cada célula son descendientes de la pequeña población de mitocondrias que viaja en el óvulo materno. Los espermatozoides son demasiado pequeños para contener mitocondrias, así que éstas se transmiten a través de la línea femenina de forma exclusiva, y los cuerpos masculinos son estaciones de término en lo que concierne a su reproducción. Significa que podemos utilizar las mitocondrias para trazar estrictamente la línea femenina de nuestros antepasados.

La teoría de Margulis es que las mitocondrias, los cloroplastos y algunas otras estructuras intracelulares son descendientes de bacterias. La célula eucariota se formó, quizás hace dos billones de años, cuando varias clases de bacterias unieron sus fuerzas, por los beneficios que cada una podía obtener de las otras. A lo largo de los eones, han llegado a integrarse tan profundamente dentro de esta unidad cooperativa que se transformó en la célula eucariota, que ha llegado a ser casi imposible detectar este hecho, si, por supuesto, es cierto que una vez fueron bacterias separadas.

Parece ser que, una vez que se inventó la célula eucariota, fue posible todo un nuevo rango de diseños. Lo más interesante, desde nuestro punto de vista, es que las células pudiesen fabricar grandes cuerpos formados por muchos miles de millones de células. Todas las células se reproducen dividiéndose en dos, y ambas mitades tienen un conjunto completo de genes. Como vimos en el caso de las bacterias situadas en la cabeza de un alfiler, sucesivas divisiones pueden generar un gran número de células en un período de tiempo bastante corto. Empezamos con una que se divide en dos. Luego cada una se divide, formando cuatro. Cada una de las cuatro se divide, formando ocho. El número aumenta por duplicaciones sucesivas, desde 8 a 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1 024, 2 048, 4 096, 8 192. Después de 20 duplicaciones, que tardan mucho, tenemos millones. Después de 40 duplicaciones, el número de células es de más de un billón. En el caso de las bacterias, el enorme número de células producidas por este mecanismo siguen caminos distintos. Lo mismo ocurre con muchas células eucariotas, por ejemplo, los protozoos, como

las amebas. Se dio un gran paso en la evolución cuando las células producidas se mantuvieron unidas, en lugar de ir por separado. Así, pudieron emerger las estructuras de orden superior, como lo hicieron, a una escala incomparablemente más pequeña, en las bioformas del ordenador con las bifurcaciones.

Por primera vez, los cuerpos de gran tamaño se convirtieron en una posibilidad. Un cuerpo humano está constituido por una población colosal de células, todas descendientes de un antepasado, el óvulo fertilizado; y, por tanto, primas, hijas, nietas, biznietas, tías, etc., de las otras células del cuerpo. Los 10 billones de células que se forman en cada uno de nosotros son producto de unas pocas generaciones de duplicaciones celulares. Estas células se clasifican en unas 210 clases diferentes (de acuerdo con los gustos), construidas por el mismo conjunto de genes, pero con distintas partes activadas en diferentes clases de células. Ésta es la razón, como hemos visto, de por qué las células del hígado son diferentes de las células del cerebro, y las células óseas de las musculares.

Los genes, a través de los órganos y los patrones de conducta de los cuerpos multicelulares, pueden lograr métodos para asegurar su propagación, que no están al alcance de las células aisladas que funcionan por sí solas. Los cuerpos multicelulares hacen posible que los genes puedan manipular el mundo, utilizando herramientas creadas a una escala varios órdenes de magnitud mayor que la de las células aisladas. Estas manipulaciones indirectas a gran escala se consiguen a través de unos efectos más directos sobre la escala miniaturizada de las células. Por ejemplo, cambiando la forma de la membrana celular. Las células se relacionan entonces unas con otras, formando enormes poblaciones que producen efectos de grupo a gran escala, como un brazo o una pierna, o (más indirectamente) un embalse para los castores. La mayor parte de las propiedades de un organismo que podemos ver con nuestros ojos son las llamadas «propiedades emergentes». Incluso las bioformas del ordenador, con sus nueve genes, tenían propiedades emergentes. En los animales reales se producen a nivel de todo el cuerpo, a través de las interacciones celulares. Un organismo funciona como una unidad completa, y sus genes puede decirse que tienen efectos sobre todo el organismo, aun cuando cada copia de un gen ejerza sus efectos inmediatos sólo en el interior de su propia célula.

Hemos visto que una parte muy importante del medio ambiente de los genes son los otros genes, que es probable que encuentren en sucesivos cuerpos, en el transcurso de las generaciones. Éstos son los genes que se permutan y combinan dentro de cada especie. Una especie que se reproduce sexualmente

puede imaginarse como un mecanismo que permuta un conjunto discreto de genes, acostumbrados a estar mutuamente en diferentes combinaciones. Cada especie, de acuerdo con este punto de vista, estaría moviendo colecciones de genes, de un lado a otro, que se encontrarían entre sí dentro de su especie, pero nunca con genes de otras especies. Existe la posibilidad de que los genes de especies distintas constituyan, sin embargo, una parte importante del medio ambiente uno del otro, aunque no se encuentren en un sitio cerrado en el interior de las células. La relación suele ser más hostil que cooperativa, pero puede tratarse simplemente de una inversión del signo. Aquí llegamos al segundo tema principal de este capítulo: «la carrera de armamentos». Existen carreras de armamentos entre depredadores y presas, parásitos y huéspedes, incluso –aunque este punto es más sutil y no lo discutiré en profundidad– entre machos y hembras, dentro de una misma especie.

Las carreras de armamentos se producen en el tiempo evolutivo, más que en la escala de tiempo de las vidas individuales. Consisten en la mejora del equipamiento para sobrevivir con que cuenta una descendencia (digamos, los animales que constituyen las presas), como consecuencia directa de las mejoras en la evolución del equipamiento de otra descendencia (digamos, los animales depredadores). Hay carreras de armamentos siempre que un individuo tenga enemigos frente a su capacidad de mejora evolutiva. Yo les concedo una importancia máxima, porque son las que han inyectado la «progresividad» que muestra la evolución. Ya que, en contra de prejuicios anteriores, no hay nada inherentemente progresivo en la evolución. Podemos verlo al considerar lo que hubiese ocurrido si los únicos problemas con los que hubiesen tenido que enfrentarse los animales hubiesen sido el clima y otros aspectos del mundo no viviente.

Después de muchas generaciones de selección cumulativa en un lugar determinado, los animales y plantas locales llegan a ajustarse bien a las condiciones reinantes, por ejemplo, las climáticas. Si hace frío, los animales tendrán pieles gruesas, o plumas. Si el clima es seco, se producirá una evolución hacia pieles impermeables, con una textura correosa o cérea, para conservar la poca agua que haya. La adaptación a las condiciones locales afecta a cada parte del cuerpo, su forma y color, sus órganos internos, su conducta y la química de sus células.

Si las condiciones en las que vive la descendencia de un animal permanecen constantes, digamos, un clima seco y caluroso que haya permanecido sin ninguna interrupción durante 100 generaciones, la evolución de esta descendencia es probable que llegase a un punto estable, por lo menos en cuanto a la adaptación que concierne a la temperatura y humedad. Los animales llegarían a estar tan bien ajustados a las condiciones locales como fuese posible. Ello no significa que no pudieran volver a ser rediseñados, incluso para ser mejores. Significa que no pueden mejorar por sí mismos mediante un *pequeño* paso (por lo tanto, probable) evolutivo: ninguno de sus vecinos *más cercanos* en el equivalente local del «espacio biomórfico» lo haría mejor.

La evolución se estacionará hasta que cambie alguna de las condiciones: el comienzo de una era glaciar, un cambio en la cantidad media de lluvia en el área, una variación en el viento dominante. Tales cambios suceden cuando tratamos con una escala de tiempo tan larga como la evolutiva. En consecuencia, la evolución, por lo común, no se estaciona, sino que continuamente «sigue la pista» de los cambios ambientales. Si hay un descenso constante de la temperatura en el área, y esta variación persiste a lo largo de siglos, las generaciones sucesivas de animales serán empujadas por una «presión» selectiva constante en la dirección, por ejemplo, de producir pieles más gruesas. Si, después de unos pocos de miles de años de baja temperatura, se invierte la tendencia y la temperatura media sube de nuevo poco a poco, los animales estarán bajo la influencia de una nueva presión selectiva, y serán empujados a producir de nuevo pieles más finas.

Pero hasta aquí sólo hemos considerado una parte limitada del medio ambiente, el clima, que es muy importante para los animales y las plantas. Su patrón cambia en el transcurso de los siglos, de forma que mantiene la evolución en constante movimiento, ya que ésta «sigue la pista» a sus cambios. Pero los patrones climáticos cambian de una manera casual, inconsistente. Hay otras partes del medio ambiente del animal que cambian en direcciones malévolas más consistentes, que también necesitan que se les «siga la pista». Estas partes son las propias cosas vivas. Para un depredador como la hiena, una parte de su medio ambiente, casi tan importante como el clima, son las presas, la población cambiante de ñus, cebras y antílopes. Para los antílopes y otros herbívoros que vagan por las llanuras en busca de pastos, el clima puede ser importante, pero los leones, hienas y otros carnívoros también lo son. La selección cumulativa demostrará qué animales están bien adaptados para correr más que sus depredadores o para engañar a sus presas, igual que demuestra si están bien adaptados a las condiciones atmosféricas predominantes. Y, así como la evolución «sigue la pista» a las fluctuaciones del clima a largo plazo, así seguirán los cambios evolutivos de las presas la pista de los cambios en los hábitos o armamento de los depredadores. Y también lo contrario, por supuesto.

Podemos utilizar el término general «enemigos» de una especie, para identificar las otras cosas vivas que trabajan para hacer difícil su supervivencia. Los leones son enemigos de las cebras. Puede parecer un poco duro invertir la afirmación de que «las cebras son enemigas de los leones». El papel de la cebra en esta relación parece demasiado inocente y perjudicado como para garantizarle el título peyorativo de «enemigo». Pero las cebras hacen todo lo posible para no ser devoradas por los leones, y, desde el punto de vista de estos últimos, significa hacerles la vida más difícil. Si las cebras y otros herbívoros tuviesen éxito en su objetivo, los leones se morirían de hambre. Así pues, siguiendo con nuestra definición, las cebras son enemigas de los leones. Los parásitos, como las lombrices, son enemigos de sus huéspedes, y éstos lo son de los parásitos, ya que tienden a producir la evolución de medidas para volverse resistentes. Los herbívoros son enemigos de las plantas, y éstas lo son de los herbívoros, hasta el punto de desarrollar espinas y sustancias químicas venenosas o de mal sabor.

Durante el transcurso del tiempo evolutivo, las descendencias de los animales y las plantas «siguen la pista» a los cambios experimentados por sus enemigos, con la misma asiduidad que siguen los cambios de las condiciones climáticas medias. Las mejoras evolutivas en el armamento y tácticas del leopardo son, desde el punto de vista de las gacelas, como un empeoramiento constante del ambiente, y hacen que sigan la pista en la misma dirección. Pero hay una diferencia esencial. El clima cambia a lo largo de los siglos, pero *no* de una manera específicamente malévola. No sale para «capturar» gacelas. El leopardo medio cambia a lo largo de los siglos, como cambia la media anual de la cantidad de lluvia. Pero mientras que la media anual de la cantidad de lluvia varía hacia arriba y abajo, sin un ritmo o una razón particular, el leopardo medio, en el transcurso de los siglos, tenderá a estar *mejor* equipado para cazar gacelas de lo que lo estaban sus antepasados. Es así porque la sucesión de leopardos, a diferencia de la sucesión de condiciones climáticas anuales, está sujeta a la selección cumulativa. Los leopardos tenderán a tener una patas más ligeras, unos ojos más agudos y unos dientes más afilados. No importa lo «hostiles» que parezcan, el clima y las demás condiciones inanimadas no muestran, necesariamente, una tendencia a ser más hostiles. Los enemigos vivos, vistos a lo largo de la escala de tiempo evolutiva, muestran esta tendencia.

La tendencia de los carnívoros a conseguir ser «mejores» se acabaría pronto, como sucede con las carreras de armamentos humanas (por razones de costo económico a las que llegaremos),

si no fuese por la existencia de una tendencia paralela en sus presas. Y viceversa. Las gacelas están sujetas a la selección cumulativa, igual que los leopardos, y tenderán también, en el transcurso de las generaciones, a mejorar su capacidad para correr con rapidez, para reaccionar velozmente o para hacerse invisibles camuflándose entre las hierbas altas. También son capaces de evolucionar para llegar a ser mejores enemigos, en este caso, de los leopardos. Desde el punto de vista de los leopardos, la temperatura media anual no mejora o empeora sistemáticamente en el transcurso de los años, excepto hasta donde un cambio para un animal bien adaptado sea un cambio para peor. Pero la gacela media anual tiende a hacerse peor, más difícil de cazar, porque está mejor adaptada para evitar los leopardos. De nuevo, la tendencia hacia una progresiva mejora en las gacelas se iría enlenteciendo hasta llegar a un punto muerto, si no fuera por la tendencia paralela hacia la mejora que muestran sus depredadores. Un lado mejora porque el otro lado ya lo ha hecho. Y viceversa. El proceso entra en una espiral ascendente, en una escala de tiempo de cientos de miles de años.

En el mundo de las naciones con una escala de tiempo más corta, cuando dos enemigos mejoran su armamento en respuesta a los avances del contrario, hablamos de una «carrera de armamentos». La analogía evolutiva está lo bastante cerca como para justificar el tomar prestado el término, y no me disculpo por ello ante mis pomposos colegas, que purgarían nuestro lenguaje de imágenes tan iluminativas. He introducido la idea en términos de un ejemplo simple, las gacelas y los leopardos. Esto es para resaltar la importante diferencia entre un enemigo vivo, que está sujeto a los cambios evolutivos, y una condición inanimada no malévola como es el clima, que, aunque está sujeto a cambios, éstos no son sistemáticos, o no son evolutivos. Llegado el momento, tengo que admitir que en mis esfuerzos por explicar este punto válido puedo haber confundido al lector. Es obvio que mi descripción de una carrera de armamentos con un avance continuo es demasiado simple, por lo menos en un aspecto. Cojamos la velocidad al correr. Hasta aquí, la idea de la carrera de armamentos parece sugerir que los leopardos y las gacelas deberían haberse vuelto más y más rápidos, generación tras generación, hasta que ambos corriesen más rápidos que el sonido. Esto no ha sucedido y nunca sucederá. Antes de seguir con la carrera de armamentos, es mi deber prevenir sobre las malas interpretaciones.

La primera puntualización es ésta. He dado la impresión de un ascenso continuo en la capacidad del leopardo para capturar presas, y en la de las gacelas para evitar depredadores. El lector

puede haber salido con una idea victoriana de lo inexorable del proceso, cada generación mejor, más sutil y más valiente que la de sus padres. La realidad no es así en la naturaleza. La escala de tiempo en la que podría detectarse una mejora significativa es, en todo caso, probablemente mucho más grande de lo que podría detectarse comparando una generación típica con su predecesora. Las «mejoras», por otra parte, están lejos de ser continuas. Son un suceso intermitente, que a veces se para e incluso «va hacia atrás», en lugar de moverse «hacia adelante» en la dirección sugerida por la idea de la carrera de armamentos. Los cambios en las condiciones, cambios en las fuerzas inanimadas que he mezclado bajo el encabezamiento general de «clima», es probable que influyan en las tendencias lentas y erráticas de la carrera de armamentos, tanto como pudiera notar cualquier observador sobre el terreno. Puede haber largos espacios de tiempo en los que no haya ningún «progreso» en la carrera de armamentos, y quizá ningún cambio evolutivo. Las carreras de armamentos, a veces, culminan en la extinción, y entonces puede comenzar otra nueva carrera en la primera casilla. Sin embargo, y a pesar de todo, la idea de la carrera de armamentos sigue siendo la explicación más satisfactoria sobre la existencia de la maquinaria avanzada y compleja que poseen los animales y las plantas. Las «mejoras» progresivas del tipo sugerido por esta imagen de la carrera de armamentos continúan, aunque se produzcan de una manera espasmódica e interrumpida; aunque su tasa neta de progreso sea demasiado lenta para ser detectada dentro del espacio de tiempo de la vida de un hombre, o dentro del espacio de tiempo de la historia registrada.

La segunda puntualización es que la relación que llamo «de enemigos» es más compleja que la simple relación bilateral sugerida por la historia de los leopardos y las gacelas. Una complicación adicional consiste en que una especie determinada puede tener dos (o más) enemigos, que incluso sean más enemigos entre sí. Éste es el principio que se esconde detrás de una medio verdad comúnmente expresada, de que la hierba se beneficia de que la pasten (o la sieguen). El ganado come hierba, y, por tanto, habría que pensar que es enemigo de la hierba. Pero la hierba también tiene otros enemigos en el mundo de las plantas, semillas que compiten con ella, y que si se las deja crecer sin control, podrían resultar unos enemigos mucho más serios que el ganado. La hierba sufre, de alguna manera, al ser devorada por el ganado, pero las semillas que compiten con ella sufren aún más. Por tanto, el efecto neto del ganado sobre un prado es que la hierba se beneficia. El ganado resulta ser, en este sentido, más amigo que enemigo de la hierba.

A pesar de todo, el ganado es enemigo de la hierba en el sentido de que aun así es cierto que una planta de hierba aislada estaría mejor si no se la comiera una vaca, y cualquier mutante que poseyera un arma química que la protegiera contra las vacas, colocaría más semillas (conteniendo instrucciones genéticas para fabricar el arma química) que los miembros rivales de su misma especie que fuesen más palatables para las vacas. Incluso si hubiese un sentido especial, en el que las vacas fuesen «amigas» de la hierba, la selección natural *no* favorecería a aquellas plantas que se saliesen de su camino para ser comidas por las vacas. La conclusión general de este párrafo es como sigue. Puede que sea conveniente pensar más en términos de carreras de armamentos entre dos descendencias como el ganado y la hierba, o las gacelas y los leopardos, pero no debemos perder de vista el hecho de que ambos participantes tienen otros enemigos contra los que desarrollan simultáneamente otra carrera de armamentos. No continuaré aquí con este punto, pero podría ampliarse en alguna de las explicaciones de por qué una carrera de armamentos determinada se estabiliza y no continúa eternamente, es decir, no conduce a que los depredadores persigan a sus presas a una velocidad Mach 2, y así sucesivamente.

La tercera «puntualización» sobre la carrera de armamentos no es tanto una puntualización como un punto interesante en sí mismo. En mi discusión hipotética sobre los leopardos y las gacelas, dije que los leopardos, a diferencia del clima, tenían tendencia, en el transcurso de las generaciones, a convertirse en «mejores cazadores» para llegar a ser enemigos más serios, mejor equipados para matar gacelas. Pero esto no implica que lleguen a tener más *éxito* matando gacelas. La idea central de la carrera de armamentos es que los dos bandos en liza están mejorando, cada uno desde su propio punto de vista, mientras que, de forma simultánea, están haciendo la vida más difícil para el otro bando. No existe una razón particular (o, por lo menos, ninguna que hayamos tratado hasta ahora) para esperar que cualquier bando llegue a tener más o menos éxito que el otro de una manera continua. De hecho, la idea de la carrera de armamentos, en su forma más pura, sugiere que debería haber una progresión cero en la *proporción de éxitos* en ambos bandos. Los depredadores estarían mejor *equipados* para matar, pero al mismo tiempo las presas estarían también mejor equipadas para evitar que las matasen, de forma que el resultado neto sería la ausencia de cambios en la proporción de muertes logradas.

Esto supone que si los depredadores de una época pudieran encontrarse con presas de otra era, mediante una máquina del tiempo, los animales más «modernos», ya fuesen depredadores

o presas, correrían en círculos alrededor de los anteriores. No se trata de un experimento que pueda verificarse con facilidad, aunque algunas personas asuman que ciertas faunas remotas y aisladas, como las de Australia y Madagascar, puedan ser tratadas como si fuesen primitivas, como si un viaje a Australia fuese un viaje hacia el pasado en la máquina del tiempo. Esta gente piensa que las especies nativas australianas son conducidas hacia la extinción por competidores o enemigos superiores introducidos desde el mundo exterior, porque las especies nativas son «más antiguas», modelos «caducos», y presentan la misma posición frente a las especies invasoras que un barco de vela enfrentándose a un submarino nuclear. Pero el supuesto de que Australia tiene una fauna «fósil viviente» es difícil de justificar. Raramente podría constituir un buen ejemplo. Me temo que no sea más que el equivalente zoológico del esnobismo chauvinista, análogo a la actitud que ve a cada australiano como un tosco vagabundo con corchos colgando alrededor del ala de su sombrero y sin mucha sustancia debajo del mismo.

El biólogo americano Leigh van Valen dio el memorable nombre de «efecto de la Reina Roja» al concepto de cambio cero en la *proporción* de éxitos, sin importar la magnitud del progreso evolutivo que sufre el *equipamiento*. En la obra *A través del espejo (Through the Looking Glass)*, se recordará que la Reina Roja cogía a Alicia de una mano y la arrastraba, con una rapidez progresiva, a través de los campos, en una carrera frenética; pero, no importa lo rápido que corriesen, siempre estaban en el mismo sitio. Alicia, comprensiblemente confundida, dijo: «En *nuestro* país uno va generalmente a algún sitio, si corre tan rápido y durante tanto tiempo como lo hemos hecho nosotras.» «Un país lento», contestó la Reina. «Aquí, ya ves, necesitas correr todo lo *que puedas*, para mantenerte en el mismo sitio. Si quisieras ir a algún sitio, tendrías que correr por lo menos ¡el doble de rápido!»

La indicación de la Reina Roja es divertida, pero puede resultar engañosa si se piensa (como a veces ocurre) que significa algo matemáticamente preciso, un progreso relativo cero. Otra equivocación es que, en la historia de Alicia, la afirmación de la Reina Roja es genuinamente paradójica, irreconciliable con el sentido común en un mundo físico real. Pero el efecto evolutivo de la Reina Roja de Van Valen no es paradójico. Está totalmente de acuerdo con el sentido común, en tanto éste se aplique de una manera inteligente. Aunque la carrera de armamentos no sea paradójica, puede dar lugar, sin embargo, a situaciones que choquen con la mentalidad económica de los seres humanos, dando la apariencia de ser ruinosas.

¿Por qué son tan altos, por ejemplo, los árboles en los bosques? Una respuesta breve sería que los demás árboles son altos, de forma que ninguno puede permitirse no serlo. Sería eclipsado si no lo fuera. Esta verdad ofendería, sin embargo, a un ser humano con una mente economicista. Parece tan sin sentido, tan ruinoso. Si todos los árboles tuviesen la altura de la bóveda del bosque, estarían todos igualmente expuestos al sol, y ninguno podría permitirse ser más bajo. Pero si fuesen *todos* más bajos, si pudiera haber algún tipo de acuerdo sindical para reducir la altura de la bóveda de los bosques, *todos* los árboles se beneficiarían. Competirían entre sí en la bóveda por la misma cantidad de sol, pero habrían «pagado» todos un precio mucho menor para situarse allí. Se beneficiaría toda la economía del bosque, y la de cada árbol en particular. Desafortunadamente, la selección natural no se preocupa de las economías globales, y no tiene espacio para carteles y acuerdos. Ha habido una carrera de armamentos en la que los árboles del bosque se fueron haciendo más altos, a lo largo de muchas generaciones. En cada estadio de esta carrera no existía un beneficio intrínseco por el mero hecho de ser altos. El único objetivo de ser alto era ser relativamente *más* alto que los árboles vecinos.

Según se fue agotando la carrera, se incrementó la altura media de la bóveda del bosque. Pero el beneficio obtenido por los árboles, por el hecho de ser más altos, no aumentó. En realidad, empeoró por el incremento del costo debido al crecimiento. Las generaciones sucesivas de árboles alcanzaron una altura mayor, pero al final podrían haber estado mejor, en cierto sentido, donde comenzaron. Así pues, aquí está la conexión con Alicia y la Reina Roja, aunque, como puede verse, en el caso de los árboles no es realmente paradójica. Es característica general de las carreras de armamentos, incluyendo las humanas, el hecho de que, aunque todos estarían mucho mejor si *ninguno* de ellos intensificase la guerra, en tanto uno de ellos lo haga, los demás no pueden permitirse el *no* hacerlo. Debo insistir, una vez más, en que he contado la historia de una manera demasiado simple. No quiero que parezca que estoy sugiriendo que los árboles de cada generación sean más altos que sus predecesores, ni que tenga que existir necesariamente una carrera de armamentos.

Otro punto ilustrado por los árboles es que la carrera de armamentos no tiene que ser necesariamente entre miembros de distintas especies. Un árbol tiene la misma posibilidad de ser eclipsado por miembros de su propia especie como de otras. De hecho, es probable que más, ya que en general todos los organismos están más amenazados por la competitividad de su propia especie que por la de otras. Los miembros de una misma

especie compiten por los mismos recursos, en una extensión mucho más definida que los de otras especies. Dentro de una especie también hay carreras de armamentos entre los papeles masculino y femenino, y entre padres y descendientes. Lo he explicado en *El gen egoísta*, y por eso no seguiré aquí.

La historia de los árboles permite introducir una distinción importante en términos generales entre dos clases de carreras de armamentos, denominadas simétrica y asimétrica, respectivamente. Una carrera de armamentos simétrica es aquella que se desarrolla entre dos competidores que tratan de hacer más o menos las mismas cosas. El caso de los árboles del bosque que luchan por alcanzar la luz es un ejemplo. No todas las especies de árboles se ganan la vida de la misma manera, pero en lo que concierne a la carrera de la que estamos hablando, en particular —la carrera por la luz solar en la bóveda del bosque—, son competidores por los mismos recursos. Están tomando parte en una carrera de armamentos en la que el éxito de una parte es percibido como un fracaso por la otra. Y es una carrera de armamentos simétrica porque la naturaleza del éxito y del fracaso es la misma en los dos bandos: alcanzar la luz del sol o ser eclipsado. La carrera de armamentos entre los leopardos y las gacelas es, sin embargo, asimétrica. Es una verdadera carrera de armamentos en cuanto a que el éxito en cualquier bando es percibido como un fracaso por el otro bando, pero la naturaleza del éxito o del fracaso es muy diferente en los dos bandos. Ambos «tratan» de hacer cosas muy diferentes. Los leopardos tratan de devorar gacelas. Las gacelas no tratan de devorar leopardos, sino que tratan de evitar ser devoradas por ellos. Estas carreras son más interesantes, desde el punto de vista evolutivo, porque existe una probabilidad mayor de que se generen sistemas defensivos muy complejos. Podemos ver cómo funcionan tomando como ejemplo la tecnología de las armas.

Podría utilizar a los EE.UU. y a la URSS como ejemplos, aunque no hay necesidad de mencionar naciones específicas. Las armas que fabrican las compañías de cualquiera de los países industrializados pueden terminar siendo compradas por una amplia diversidad de naciones. La existencia de un arma ofensiva eficaz, como el misil a ras de superficie tipo Exocet, «induce» el desarrollo de un arma efectiva que lo contrarrestre, por ejemplo, un mecanismo de radiointerferencia para «confundir» al sistema de control del misil. Lo más probable es que esta arma neutralizadora sea fabricada por un país enemigo, pero podría ser fabricada por el mismo país, incluso por la misma compañía. Ninguna compañía, después de todo, estaría mejor equipada para diseñar un mecanismo de interferencia contra un misil

determinado que la que lo diseñó. No existe nada inherentemente improbable sobre el hecho de que la misma compañía produzca ambos dispositivos y los venda a bandos opuestos. Soy lo bastante cínico como para sospechar que es probable que suceda así, y serviría para ilustrar vívidamente el punto sobre la mejora del *equipamiento* mientras su *eficacia* neta permanece estable (y aumenta su costo).

Desde mi punto de vista, la cuestión de si los fabricantes que suministran armas a bandos opuestos en una carrera de armamentos son enemigos, uno de otro, o es el mismo, es irrelevante. Lo que importa es que, independientemente de sus fabricantes, los propios mecanismos son enemigos entre sí, en el sentido especial que he definido en este capítulo. El misil, y su mecanismo de interferencia específico, son enemigos entre sí, en cuanto que el éxito de uno es sinónimo del fracaso del otro. El que sus diseñadores sean también enemigos entre sí es irrelevante, aunque probablemente sería más fácil asumir que lo son.

Hasta ahora, he discutido el ejemplo del misil y su antimisil específico, sin poner mucho énfasis en el aspecto evolutivo, progresivo, que es, después de todo, la razón principal para traerlo a este capítulo. Lo esencial aquí es que no es sólo el diseño actual de un misil el que induce, o pone en marcha, el desarrollo de un antimisil apropiado, el mecanismo de radiointerferencia. El mecanismo antimisil, a su vez, induce una mejora en el diseño del misil, que contrarreste el antimisil de una manera específica, un mecanismo anti-antimisil. Es como si cada mejora en el misil estimulase *por sí misma* el siguiente paso, a través de sus efectos sobre el antimisil. Se van produciendo mejoras en el equipamiento por un mecanismo de autoalimentación. Esta es la receta para una evolución explosiva, desenfrenada.

Después de algunos años de este vaivén de inventos y contrainventos, las versiones actuales del misil y de su antimisil habrán alcanzado un alto grado de sofisticación. Y aun así —y aquí está de nuevo el efecto de la Reina Roja— no existe razón alguna para suponer que uno de los dos bandos en la carrera de armamentos tenga más éxito en el desarrollo de su trabajo del que tenía al comienzo de la misma. Si el misil y su antimisil han evolucionado al mismo ritmo, esperaríamos, por supuesto, que las últimas versiones, más avanzadas y sofisticadas, y las primeras versiones, más primitivas y simples, tuviesen el mismo éxito contra sus mecanismos opuestos contemporáneos. Ha habido un progreso en diseño, pero no en rendimiento, y esto se debe a que los diseños de ambos bandos en la carrera de armamentos han sufrido un progreso idéntico, y *por esta razón* han alcanzado tanto desarrollo a nivel de sofisticación. Si un bando,

por ejemplo el mecanismo de interferencia antimisil, se desarrollase demasiado, el otro bando, en este caso el misil, dejaría de utilizarse y de fabricarse: se «extinguiría». Lejos de ser una paradoja, como en el ejemplo original de Alicia, el efecto de la Reina Roja en este contexto de la carrera de armamentos resulta fundamental para la idea de avance progresivo.

Dije que era más probable que las carreras de armamentos asimétricas produjesen mejoras progresivas más interesantes que las simétricas, y ahora veremos por qué, utilizando el ejemplo de las armas. Si una nación tiene una bomba de 2 megatones, la nación enemiga desarrollará una bomba de 5 megatones. Esto provocará que la primera nación desarrolle una bomba de 10 megatones, lo que, a su vez, provocará que la segunda fabrique una bomba de 20 megatones y así sucesivamente. Se trata de una verdadera carrera de armamentos progresiva: cada avance en un lado provoca un avance en el otro, y el resultado es un aumento progresivo de algunos atributos, con el transcurso del tiempo, en este caso, el poder explosivo de las bombas. Pero no hay una correspondencia detallada, punto por punto, entre los diseños de esta clase de carrera de armamentos simétrica, sus detalles no se «entrecruzan» ni se «entrelazan», como en la carrera de armamentos asimétrica entre los misiles y los mecanismos que interfieren con su funcionamiento. El mecanismo de interferencia está específicamente diseñado para superar unas características concretas de un misil determinado; el diseñador del antimisil toma en cuenta detalles mínimos del diseñador del misil. Posteriormente, al diseñar un anti-antimisil, el diseñador de la siguiente generación de misiles hará uso de sus conocimientos del diseño detallado del antimisil de la generación anterior. Esto no es cierto en el caso de las bombas cuya potencia en megatones crece de forma continua. Para estar seguros, los diseñadores de un bando podrían piratear ideas, o imitar las características de los diseños del otro bando. Pero, suponiendo que fuera así, sería incidental. No es *necesario* que los detalles del diseño de una bomba soviética tengan una correspondencia detallada, punto por punto, con los detalles específicos de una bomba americana. En el caso de una carrera de armamentos asimétrica, entre unas armas y sus mecanismos de interferencias específicos, son las correspondencias punto por punto las que conducen, a lo largo de «generaciones» sucesivas, a una mayor complejidad y sofisticación.

También en el mundo viviente podemos encontrar diseños complejos y sofisticados allí donde nos enfrentemos con los productos finales de una larga carrera de armamentos asimétrica, en la que los avances de un bando hayan sido siempre igualados, punto por punto, por los *antídotos* (en contraposición con los competidores) logrados por el otro bando. Es una carrera de armamentos conspicuamente cierta entre depredadores y presas, y, quizá más aún, entre parásitos y huéspedes. Los sistemas de armamento electrónicos y acústicos de los murciélagos, que vimos en el capítulo 2, tienen la sofisticación finamente ajustada que esperamos de los productos finales de una larga carrera de armamentos. Sin que resulte sorprendente, podemos trazar esta misma carrera de armamentos en el otro bando. Los insectos que cazan los murciélagos tienen una batería comparable de pertrechos electrónicos y acústicos. Incluso algunas pequeñas mariposas nocturnas emiten ultrasonidos similares a los de los murciélagos que permiten eludirlos. Casi todos los animales están en peligro de ser devorados por otros animales, o en peligro de fracasar en la tarea de devorar a otros animales, y una gran cantidad de hechos detallados sobre los animales sólo tienen sentido cuando recordamos que son los productos finales de una larga y amarga carrera de armamentos. H. B. Cott, autor de la clásica obra *Animal Coloration* (Coloración animal), apuntó ya en 1940 lo que puede ser la primera utilización impresa de la analogía de la carrera de armamentos en biología:

> Antes de afirmar que la apariencia deceptiva de un saltamontes o de una mariposa está innecesariamente detallada, debemos averiguar cuáles son los poderes de percepción y discriminación de los enemigos naturales del insecto. No hacerlo es como afirmar que el blindaje de un crucero es demasiado pesado, o el rango de tiro de sus cañones demasiado grande, sin preguntar sobre la naturaleza y efectividad del armamento del enemigo. En la lucha primitiva de la jungla, como en los refinamientos de la guerra civilizada, vemos progresar una gran carrera evolutiva de armamentos, cuyos resultados se manifiestan en el desarrollo, para la defensa, de mecanismos como la velocidad, el estado de alerta, el blindaje, la posesión de espinas, el tipo de madrigueras, los hábitos nocturnos, las secreciones venenosas, el sabor nauseabundo, y [el camuflaje u otras formas de coloración protectora]; y para el ataque, en el de atributos opuestos como la velocidad, la capacidad de sorpresa, de emboscada, de seducción, la agudeza visual, los colmillos, los dientes, los aguijones, los dientes venenosos, y [los señuelos]. Así como se ha desarrollado una mayor velocidad en el perseguido, en relación con un incremento en la velocidad del perseguidor, o una coraza defensiva, en relación con la presencia de armas agresivas, así también ha evolucionado la perfección de los mecanismos de camuflaje en respuesta a un incremento en los poderes de percepción.

En la tecnología humana, las carreras de armamentos son más fáciles de estudiar que sus equivalentes biológicos porque

son mucho más rápidas. Podemos verlas transcurrir, en realidad, de año en año. Por el contrario, en el caso de una carrera de armamentos biológicos, sólo podemos ver los productos finales. Muy raramente se fosiliza un animal muerto o una planta, y entonces es posible ver, a veces, un poco más directamente los estadios progresivos de la carrera de armamentos entre animales. Uno de los ejemplos más interesantes está relacionado con la carrera de armas electrónicas, como lo demuestran los tamaños de los cerebros de los fósiles animales.

Los cerebros no se fosilizan pero los cráneos sí, y la cavidad en la que estaba albergado el cerebro —el estuche del cerebro—, si se interpreta con cuidado, puede suministrar una buena indicación de su tamaño. He dicho «si se interpreta con cuidado», y esta condición es importante. Entre otros muchos problemas está el siguiente. Los grandes animales tienen tendencia a tener grandes cerebros, en parte porque son grandes, pero eso no significa necesariamente que sean «más listos». Los elefantes tienen cerebros más grandes que los seres humanos pero, probablemente con cierta justicia, nos gusta pensar que somos más listos que ellos y que nuestros cerebros son «realmente» más grandes, si tenemos en cuenta que somos animales mucho más pequeños. Nuestros cerebros ocupan una *proporción* mucho mayor de nuestro cuerpo que los de los elefantes, como evidencia la forma abultada de nuestros cráneos. Esto no es *sólo* una vanidad de especie. Presumiblemente, se necesita una fracción sustancial de cualquier cerebro para realizar las operaciones rutinarias de mantenimiento del cuerpo y, por tanto, un cuerpo grande necesitará un cerebro grande. Debemos encontrar alguna forma de extraer de nuestros cálculos esta fracción de cerebro que puede atribuirse simplemente al tamaño del cuerpo, de manera que podamos comparar el resto como la verdadera «cerebración» de los animales. Ésta es otra forma de decir que necesitamos una manera de definir con exactitud lo que queremos decir por verdadera cerebración. Diferentes personas se han tomado la libertad de producir distintos métodos para realizar los cálculos, pero el índice más autorizado tal vez sea el «cociente de encefalización» o EQ, utilizado por Harry Jerison, una de las primeras autoridades americanas en historia del cerebro.

El EQ se calcula de una manera bastante complicada, utilizando logaritmos del peso del cerebro y del peso del cuerpo, y estandarizándolo frente a las cifras medias de un grupo mayor, como el de los mamíferos en su totalidad. Así como el cociente de inteligencia o IQ utilizado (o mal utilizado) por los psicólogos está estandarizado frente a la media de una población, el EQ lo está frente a la totalidad de los mamíferos. Así como un

IQ de 100 significa, por definición, un IQ idéntico a la media de la población, un EQ de 1 significa, por definición, un EQ idéntico a la media de los mamíferos de ese tamaño. Los detalles de la técnica matemática no son relevantes. En otras palabras, el EQ de una especie determinada, un rinoceronte o un gato, es una medida de la mayor (o menor) dimensión del cerebro del animal, respecto a lo que *esperamos* que sea, dado su tamaño corporal. La manera de calcular esta expectativa está abierta a toda crítica. El hecho de que los seres humanos tengan un EQ de 7 y los hipopótamos un EQ de 0,3 no significa que sean 23 veces más inteligentes que los hipopótamos. Pero el EQ medido nos está diciendo *algo* sobre cuánto «poder de computación» tiene un animal en su cabeza, por encima del mínimo indispensable necesario para el funcionamiento rutinario de su cuerpo, grande o pequeño.

Los EQ medidos entre mamíferos modernos son muy variados. Las ratas tienen un EQ de alrededor de 0,8, ligeramente inferior a la media de todos los mamíferos. Las ardillas lo tienen algo más alto, alrededor de 1,5. Quizás el mundo tridimensional de los árboles requiere un poder de computación adicional para controlar la precisión de los saltos, e incluso para pensar en las vías más eficientes a través de los laberintos de ramas que puedan estar conectadas, o no, más adelante. Los monos están bastante por encima de la media, y los simios (especialmente nosotros) incluso más arriba. Dentro de los monos resulta que algunos tipos tienen EQ más altos que otros y que existe alguna conexión con la forma de vida: los monos que comen insectos y los que comen frutas tienen cerebros más grandes, para su tamaño, que los que comen hojas. Tiene algún sentido argumentar que un animal necesita menos poder de computación para encontrar hojas, que abundan, que para encontrar fruta, que hay que buscarla, o para cazar insectos, que necesita una intervención activa. Desafortunadamente, se contempla ahora como si la verdadera historia fuese más completa, y otras variables, como el ritmo metabólico, pudiesen ser más importantes. En los mamíferos contemplados en su totalidad, los carnívoros tienen un EQ ligeramente más alto que los herbívoros que cazan. Puede que el lector tenga alguna idea sobre la causa, pero es difícil probarlo. Ahora bien, cualquiera que sea la razón, parece que es un hecho.

Hasta aquí, los animales modernos. Lo que hizo Jerison fue reconstruir el EQ probable de los animales extinguidos, que ahora existen sólo como fósiles. Calculó el tamaño del cerebro haciendo moldes de escayola del interior de los estuches cerebrales. Hay bastantes conjeturas y estimaciones sobre esto, pero

los márgenes de error no son tan grandes como para invalidar todo el trabajo. La precisión de los métodos para realizar los moldes de escayola puede comprobarse, después de todo, con animales modernos. Podemos suponer que todo lo que tenemos de un animal moderno es un cráneo, utilizar un molde de escayola para estimar el tamaño de su cerebro a partir del mismo, y comprobarlo entonces con el cerebro real, para ver la precisión de nuestra estimación. Estas comprobaciones en cráneos modernos fomentan la confianza en las estimaciones de Jerison sobre los cerebros ya desaparecidos. Sus conclusiones son que, en primer lugar, hay una tendencia en los cerebros a volverse más grandes en el transcurso de millones de años. En un momento determinado, los herbívoros actuales mostraron una tendencia a tener cerebros más pequeños que los carnívoros contemporáneos que los cazaban. Más tarde, los herbívoros mostraron una tendencia a tener cerebros mayores que los herbívoros anteriores, y los carnívoros, cerebros mayores que los carnívoros anteriores. Parece que estamos viendo, en los fósiles, una carrera de armamentos, o, más bien, una serie de carreras de armamentos que comienzan una y otra vez, entre carnívoros y herbívoros. Esta es una historia paralela a las carreras de armamentos humanas, ya que el cerebro es el ordenador de a bordo utilizado por carnívoros y herbívoros, y la electrónica es el elemento que avanza con más rapidez en la tecnología de armamentos humanos de hoy día.

¿Cómo terminan las carreras de armamentos? Algunas veces, con la extinción de un bando, en cuyo caso el otro bando es probable que frene en su evolución hacia esa dirección, y, por supuesto, incluso es probable que sufra una «regresión» por razones económicas que pronto discutiremos. En otros casos, las presiones económicas pueden imponer una estabilización, aun cuando un bando en la carrera esté, en cierto sentido, permanentemente a la cabeza. Cojamos la velocidad al correr, por ejemplo. Debe de haber un límite extremo a la velocidad a la que pueda correr un leopardo o una gacela, impuesto por las leyes de la física. Pero tanto los leopardos como las gacelas no lo han alcanzado. Ambos han avanzado hasta un límite inferior, por lo que creo que tiene un carácter económico. La tecnología de alta velocidad no es barata. Requiere huesos largos en las piernas, músculos poderosos, y pulmones de gran capacidad. Estos elementos puede obtenerlos cualquier animal que los necesite para correr rápido, pero hay que *comprarlos*. Se compran a un precio que aumenta de una forma excesiva. El precio se mide en lo que los economistas llaman el «costo de oportunidad». El costo de oportunidad de algo se mide como la suma

de todas las cosas a las que hay que renunciar para tener ese algo. El coste de enviar a un niño a una escuela de pago, privada, son todas las cosas que uno no se puede comprar como resultado: el coche nuevo, las vacaciones al sol (si se es tan rico que uno puede permitirse todas estas cosas fácilmente, el costo de oportunidad de enviar al niño a una escuela privada puede ser cercano a cero). El precio de tener los músculos de las piernas más largos, para un leopardo, son todas las cosas que el leopardo *podría haber hecho* con el material y la energía utilizados para fabricarlos, por ejemplo, producir más leche para los cachorros.

¡Por supuesto, no hay nada que sugiera que los leopardos tengan un sistema de contabilidad en sus cabezas! Todo lo hace automáticamente la selección natural. Un leopardo que no tenga unos músculos tan desarrollados en las patas puede que no corra tan rápido, pero tiene estos recursos para repartir, para producir más leche y, por tanto, quizá, para criar otro cachorro. Criarán más cachorros los leopardos cuyos genes los equipen con un compromiso óptimo entre la velocidad de carrera, la producción de leche y las demás peticiones presupuestarias. No resulta obvio cuál sea el equilibrio óptimo entre la producción de leche y la velocidad de carrera, por ejemplo. Es ciertamente diferente para distintas especies, y puede fluctuar dentro de cada una. Lo único que es cierto es que los equilibrios de esta clase son inevitables. Cuando los leopardos y las gacelas alcancen la velocidad máxima de carrera que «puedan permitirse», con sus economías internas, la carrera de armamentos entre ellos habrá llegado a su fin.

Los respectivos niveles económicos alcanzados puede que no les dejen igualmente equilibrados. Puede que los animales de presa acaben gastando una parte mayor de su presupuesto en el armamento de defensa que los depredadores en el armamento de ataque. Una razón se resume en la moral de Esopo: el conejo corre más que el zorro porque el conejo corre para salvar su vida, mientras que el zorro sólo corre para cenar. En términos económicos, esto significa que los zorros que desvían recursos a otros proyectos pueden tener más éxito que los que emplean virtualmente todos sus recursos en la tecnología de la caza. Por otra parte, en la población de conejos, el balance de la ventaja económica se desviará hacia aquellos que son grandes inversores en equipo que les permita correr más. La conclusión de estos presupuestos, balanceados económicamente *dentro* de cada especie, es que las carreras de armamentos *entre* especies muestran una tendencia a alcanzar un final mutuamente estable, con un bando a la cabeza.

No es probable que seamos testigos de carreras de armamentos en progreso, porque no es probable que transcurran en un «momento» determinado del tiempo geológico, como nuestro tiempo. Pero los animales que vemos ahora pueden interpretarse como los productos finales de una carrera de armamentos que transcurrió en el pasado.

Para resumir el mensaje de este capítulo, los genes no son seleccionados por sus cualidades intrínsecas, sino en virtud de sus interacciones con su medio ambiente. Un componente importante del medio ambiente de un gen son los demás genes. El motivo por el que es un componente tan importante estriba en que los otros genes también cambian durante la evolución, en el transcurso de las generaciones. Esto tiene dos clases de consecuencias importantes.

Primero, significa que resultarán favorecidos aquellos genes que tienen la propiedad de «cooperar» con aquellos otros con los que es probable que se encuentren en circunstancias que favorezcan esta cooperación. Esto es especialmente cierto, aunque no de forma exclusiva, de los genes dentro de una misma especie, porque comparten con frecuencia las mismas células. Ello ha conducido a la evolución de grandes grupos de genes cooperativos y, en último extremo, a la evolución de los propios cuerpos, como productos de esta empresa en cooperación. Un cuerpo individual es un gran vehículo, o una «máquina de supervivencia» construida por una cooperativa de genes, para la conservación de las copias de cada miembro de esa cooperativa. Cooperan porque todos salen ganando con el resultado —la supervivencia y reproducción del cuerpo que tienen en común— y porque todos constituyen una parte importante del medio ambiente en el que la selección natural influye sobre cada uno.

Segundo, las circunstancias no siempre favorecen la cooperación. En su marcha a través del tiempo geológico, los genes se encuentran también unos con otros en circunstancias que favorecen el antagonismo. Esto es especialmente cierto, aunque no de forma exclusiva, de los genes de distintas especies. Lo esencial sobre especies diferentes es que sus genes no se mezclan, porque los miembros de una especie no pueden cruzarse entre sí. Cuando los genes seleccionados en una especie facilitan el medio ambiente en el que se seleccionan genes de otras especies, el resultado es, con frecuencia, una carrera de armamentos evolutiva. Cada nueva mejora genética seleccionada en un bando de la carrera de armamentos, los depredadores, cambia el medio ambiente para la selección de genes en el otro bando de la carrera de armamentos: las presas. Las carreras de armamentos de esta clase han sido las principales responsables

de la cualidad aparentemente *progresiva* de la evolución, la evolución de una velocidad de carrera en continua mejora, la habilidad de volar, la agudeza visual, la agudeza auditiva, y así sucesivamente. Estas carreras de armamentos no continúan siempre, sino que se estabilizan cuando, por ejemplo, las mejoras adicionales llegan a ser económicamente demasiado costosas para los animales implicados.

Éste ha sido un capítulo difícil, pero tenía que figurar en el libro. Sin él, nos habríamos quedado con la sensación de que la selección natural es sólo un proceso destructivo, o, como mucho, un proceso de limpieza de las malas hierbas. Hemos visto dos casos en los que la selección natural puede resultar una fuerza *constructiva*. Uno afecta a la relación de cooperación entre genes dentro de una misma especie. Nuestra hipótesis fundamental debe ser que los genes son entidades «egoístas», que trabajan para su propia propagación en el «pool» de genes de la especie. Pero como el medio ambiente de un gen consiste, en un alto grado, en que *otros* genes estén también seleccionados en el mismo «pool» de genes su selección será favorecida si muestran una buena cooperación con los otros genes del mismo «pool». A ello se debe que hayan evolucionado los grandes cuerpos compuestos de células, que trabajan coherentemente hacia la consecución de los mismos fines cooperativos. Éste es el motivo por el que existen los cuerpos, en lugar de existir duplicadores aislados batallando aún en el caldo primitivo.

Los cuerpos evolucionaron con un propósito integrado y coherente porque los genes son seleccionados en el medio ambiente facilitado por otros genes *dentro de una misma especie*. Pero debido a que también son seleccionados en un medio ambiente suministrado por otros genes de diferentes especies, se desarrollan carreras de armamentos. Y las carreras de armamentos constituyen la otra gran fuerza que impulsa la evolución en direcciones que reconocemos como «progresivas», y de «diseños» complejos. Las carreras de armamentos producen una sensación de «desbocamiento» inherentemente inestable. Galopan hacia el futuro de una forma que es, por una parte, insustancial y fútil y, por otra, progresiva e infinitamente fascinante para nosotros, los observadores. El próximo capítulo recoge un caso particular, bastante especial, de evolución desenfrenada, explosiva: el caso que Darwin llamó la selección sexual.

8. EXPLOSIONES Y ESPIRALES

La mente humana es una fábrica inveterada de analogías. Nos sentimos compulsivamente atraídos a ver un significado en ligeras similitudes entre procesos muy diferentes. Yo empleé la mayor parte de un día en Panamá observando cómo dos colonias de hormigas comedoras de hojas luchaban entre sí, y mi mente comparaba, de manera irresistible, aquel campo de batalla sembrado de miembros, con los cuadros que había visto de Passchendaele. Casi podía oír los cañones y oler el humo. Poco después de la publicación de mi primer libro, *El gen egoísta*, fui abordado en distintas ocasiones por dos clérigos, que habían llegado a la misma analogía entre algunas ideas del libro y la doctrina del pecado original. Darwin aplicó la idea de evolución de una manera preferente a los organismos vivos que cambian de forma corporal a lo largo de incontables generaciones. Sus sucesores se han visto tentados a ver una evolución en todas las cosas, en la forma cambiante del universo, en las «etapas» de desarrollo de las civilizaciones humanas, en la moda del largo de la falda. A veces, estas analogías resultan muy fructíferas, pero es fácil llevarlas demasiado lejos, y sentirse sobreexcitado por otras tan tenues que no sirven de ayuda e incluso son francamente perjudiciales. Me he acostumbrado a recibir mi parte de correo excéntrico, y he aprendido que uno de los distintivos de la extravagancia fútil son las analogías hechas con demasiado entusiasmo.

Por otra parte, algunos de los mayores avances científicos se produjeron porque una persona inteligente descubrió una analogía entre un tema ya comprendido, y otro aún misterioso. El truco radica en encontrar un equilibrio entre las analogías demasiado indiscriminadas y la ceguera estéril frente a las fructíferas. El científico que triunfa y el loco extravagante están separa-

dos por la calidad de sus inspiraciones. Pero sospecho que, en la práctica, esto equivale a una diferencia, que no reside tanto en la capacidad de *observar* analogías como en la de *rechazar* las absurdas y perseguir las útiles. Pasando por alto el hecho de que aún tenemos aquí otra analogía, que puede ser absurda o fructífera (y ciertamente no es original), entre el progreso científico y la selección evolutiva darwiniana, permítanme que vaya al punto relevante de este capítulo. Ocurre que estoy a punto de embarcarme en dos analogías estrechamente vinculadas que encuentro inspiradoras pero que pueden llevarse demasiado lejos si no tengo cuidado. La primera es una analogía entre varios procesos unidos por su parecido con las explosiones. La segunda es una analogía entre la verdadera evolución darwiniana y lo que se ha dado en llamar evolución cultural. Pienso que ambas pueden ser fructíferas, o, como es obvio, no les dedicaría un capítulo. El lector queda avisado.

La propiedad relevante de las explosiones es lo que los ingenieros conocen como «retroalimentación positiva». Se la comprende mejor comparándola con su opuesto, la retroalimentación negativa. Ésta constituye la base de la mayoría de los controles y regulaciones automáticas, y uno de sus ejemplos más claros y mejor conocidos es el regulador a vapor de Watt. Una máquina útil debe suministrar un poder rotacional a un ritmo constante, el ritmo correcto para el trabajo que esté realizando: moler, tejer, bombear o cualquiera que sea. Antes de Watt, el problema era que el ritmo de rotación dependía de la presión del vapor. Si se atizaba la caldera, se aceleraba la máquina, lo que resultaba insatisfactorio para un molino o un telar que precisan máquinas con una conducción uniforme. El regulador de Watt es una válvula automática que controla el flujo de vapor hacia el pistón.

La inteligente jugada consistió en conectar la válvula al movimiento rotatorio producido por la máquina, de forma que cuanto más rápida iba la máquina más se cerraba el paso de vapor. Por el contrario, la válvula se abría cuando la máquina iba despacio. Por tanto, una máquina que fuese demasiado lenta se aceleraba mientras que otra que fuese demasiado rápida disminuía su velocidad. La manera precisa que tiene el regulador para medir la velocidad es simple pero eficaz, y el principio se utiliza aún hoy. El mecanismo consiste en un par de bolas situadas en unos brazos articulados, que giran controlados por la máquina. Cuando giran rápido, las bolas se elevan sobre sus bisagras, por acción de la fuerza centrífuga. Cuando giran lentamente, permanecen colgadas. Los brazos articulados están unidos directamente con la válvula que regula el vapor. Con un ajuste ade-

cuado, el controlador de Watt puede mantener una máquina girando con un ritmo casi constante, en presencia de fluctuaciones considerables en el fogón.

El principio subyacente en el regulador de Watt es la retroalimentación negativa. La potencia útil de la máquina (en este caso, el movimiento rotatorio) es retroalimentada (a través de la válvula de vapor). La retroalimentación es *negativa* porque un rendimiento elevado (una rotación más veloz de las bolas), tiene un efecto negativo sobre el consumo de energía (suministro de vapor). Por el contrario, un rendimiento bajo (rotación lenta de las bolas) hace subir el consumo (de vapor), invirtiendo de nuevo el signo. Introduje la idea de retroalimentación negativa sólo para contrastarla con la retroalimentación positiva. Tomemos una máquina de vapor con un regulador de Watt, y hagámosle un cambio crucial. Invirtamos el signo de la relación entre el mecanismo centrífugo de las bolas y la válvula de vapor. Ahora, cuando las bolas giren rápido, la válvula, en lugar de cerrarse como lo hacía con Watt, se *abrirá*. Por el contrario, cuando las bolas giren despacio, la válvula, en lugar de aumentar el flujo de vapor, lo reducirá. Una máquina con un controlador de Watt normal, que empezase a reducir su velocidad, corregiría pronto esta tendencia y aceleraría de nuevo hasta alcanzar la velocidad deseada. Pero la modificación de nuestra máquina hace justo lo contrario. Si comienza a perder velocidad, hace que pierda aún más. Pronto el regulador de la válvula se irá cerrando hasta pararse. Si, por el contrario, se acelera un poco, en lugar de corregirse esta tendencia, como sucedería en una máquina de Watt normal, se incrementará. La ligera aceleración se verá reforzada por la inversión del regulador, y la máquina se acelerará. Es retroalimentada de manera positiva, y se acelerará aún más. Continuará así hasta que la máquina se rompa por el esfuerzo y el volante salga despedido atravesando la pared de la fábrica, o hasta que no haya más presión de vapor disponible, y se establezca una velocidad máxima.

Donde el regulador original de Watt utilizaba la retroalimentación negativa, nuestro hipotético regulador modificado constituye el ejemplo opuesto de retroalimentación positiva. Los procesos con retroalimentación positiva son cualitativamente inestables, descontrolados. Cualquier perturbación inicial ligera aumenta, y desemboca en una espiral que progresa de manera continua, culminando en un desastre o en una eventual regulación de la válvula a un nivel superior debido a otros procesos. Los ingenieros han encontrado útil reunir una amplia variedad de procesos bajo el encabezamiento de retroalimentación negativa, y otra bajo el de retroalimentación positiva. Las analogías son

fructíferas no sólo en sentido cualitativo, sino también porque todos los procesos comparten los mismos cálculos matemáticos básicos. Los biólogos que estudian fenómenos como el control de la temperatura corporal, y los mecanismos de saciedad que evitan comer con exceso, han encontrado útil tomar prestados los cálculos matemáticos de los ingenieros sobre la retroalimentación negativa. Los sistemas de retroalimentación positiva se utilizan menos que los de retroalimentación negativa, tanto en el caso de los ingenieros como en los cuerpos vivos, pero, sin embargo, constituyen el tema de este capítulo.

La razón por la que los ingenieros y los cuerpos vivos utilizan más los sistemas de retroalimentación negativa es, por supuesto, porque es útil controlar la regulación cerca de un nivel óptimo. Los procesos inestables, descontrolados, lejos de ser útiles, pueden resultar francamente peligrosos. En química, un proceso de retroalimentación positivo típico es una explosión, y por lo común, utilizamos la palabra explosivo para describir cualquier proceso incontrolado. Por ejemplo, podemos referimos a una persona y decir que tiene un temperamento explosivo. Uno de mis maestros era un hombre culto, cortés y habitualmente afable, pero tenía explosiones temperamentales ocasionales, de las que él mismo se daba cuenta. Cuando era provocado de una manera extrema en clase, al principio no decía nada, pero su rostro reflejaba que algo raro sucedía en su interior. Entonces comenzaba a decir, con tono tranquilo y razonable: «Querido amigo, no puedo aguantarle. Voy a perder los estribos. Pónganse debajo de sus pupitres. Les aviso. Se acerca.» Durante todo este tiempo, su voz iba subiendo de tono, y durante el *crescendo* cogía cualquier cosa a su alcance, libros, borradores de pizarra, pisapapeles, tinteros, y los arrojaba en rápida sucesión, con extrema fuerza y ferocidad y, además, con una intención salvaje, hacia el muchacho que le había provocado. Su temperamento se iba calmando gradualmente, y al día siguiente ofrecía las más gentiles disculpas al mismo muchacho. Se daba cuenta de que había perdido el control, había sido testigo de su transformación en víctima de un mecanismo de retroalimentación positiva.

Pero los mecanismos de retroalimentación positiva no sólo conducen a aumentos descontrolados; pueden conducir a descensos incontrolados. Hace poco asistí a un debate en la *Congregation*, el «parlamento» de la Universidad de Oxford, sobre si se debería ofrecer un título honorífico a alguien. La decisión fue controvertida. Después de la votación, durante los 15 minutos que tardaron en contar las papeletas, se escuchaba un bullicio de conversaciones de quienes esperaban oír los resultados. En un momento dado, la conversación se calmó, y se hizo un si-

lencio total. La razón se debió a un tipo especial de retroalimentación positiva. Funciona como sigue. Cualquier murmullo general está destinado a tener fluctuaciones al azar en el nivel de ruido, más alto y más bajo, que no solemos advertir. Una de estas fluctuaciones, en dirección hacia la calma, fue ligeramente más intensa de lo habitual, con el resultado de que algunas personas se dieron cuenta. Como todo el mundo estaba ansioso por el anuncio del resultado de los votos, los que percibieron la disminución accidental del nivel de ruido intentaron averiguarlo e interrumpieron sus conversaciones. Esto hizo que el nivel general de ruido disminuyera un poco más, que lo notara más gente y dejaran de hablar. Se había iniciado una retroalimentación positiva que continuó con bastante rapidez, hasta que se hizo un silencio total en la sala. Cuando nos dimos cuenta de que era una falsa alarma, se produjeron risas seguidas de una lenta escalada del ruido hasta el nivel previo.

Las retroalimentaciones positivas más espectaculares son aquellas cuyo resultado no es una disminución, sino un aumento descontrolado de algo: una explosión nuclear, un maestro que pierde sus estribos, una pelea en un bar, una escalada de insultos en las Naciones Unidas (el lector puede considerar el aviso con el que empecé este capítulo). La importancia de la retroalimentación positiva en los asuntos internacionales está reconocida implícitamente en la palabra «escalada»: cuando decimos que el Oriente Medio es un «polvorín» y cuando identificamos las «chispas» que inician un suceso. Una de las expresiones más conocidas sobre la idea de la retroalimentación positiva está en el evangelio según san Mateo: «A todo aquel que tenga le será dado, y nadará en la abundancia; pero el que no tenga se le quitará incluso lo que tiene.» Este capítulo trata de retroalimentaciones positivas en la evolución. Algunas características de los organismos vivos parecen productos finales de algo como un proceso evolutivo explosivo, descontrolado, dirigido por una retroalimentación positiva. De una manera limitada, las carreras de armamentos del capítulo previo son un ejemplo, pero los ejemplos realmente espectaculares se encuentran en los órganos de atracción sexual.

Trate de persuadirse el lector, como trataron de persuadirme a mí cuando era un estudiante universitario, de que el abanico de la cola de un pavo real es un órgano mundanalmente funcional como un diente o un riñón, diseñado por la selección natural para realizar simplemente el trabajo utilitario de etiquetar a un pájaro de una manera inequívoca como miembro de esta especie y no de aquélla. Nunca me persuadieron, y dudo que alguien pueda persuadirse de esto. Para mí, el abanico de

la cola del pavo real tiene la estampa inequívoca de una retroalimentación positiva. Es claramente un producto de algún tipo de explosión incontrolada, inestable, que tuvo lugar en el tiempo evolutivo. Así lo pensó Darwin, en su teoría de la selección sexual, y así, de una manera explícita y en tantas palabras, lo pensó el más grande de sus sucesores, R. A. Fisher. Después de un pequeño razonamiento, concluyó (en su libro *The Genetical Theology of Natural Selection* [La teología genética de la selección natural]):

> el desarrollo del plumaje en el macho, y la preferencia sexual por este desarrollo de la hembra, deben avanzar juntos, y en tanto el proceso no sea frenado por una marcada antiselección, avanzará con una velocidad progresiva. En ausencia de este freno, es fácil ver que la velocidad de desarrollo será proporcional al desarrollo alcanzado, y que se incrementará, por tanto, exponencialmente, o en progresión geométrica, con el tiempo.

Es típico de Fisher que lo que a él le pareció «fácil de ver» los demás no lo entendiesen. Él no se molestó en explicar con detalle su afirmación de que la evolución de un plumaje atractivo desde un punto de vista sexual podía avanzar con una velocidad progresiva, de una manera exponencial, explosiva. El resto del mundo biológico tardó unos cincuenta años en entenderle y reconstruir, finalmente, en su totalidad, la clase de argumento matemático que Fisher debía de haber utilizado, en el papel o en su cabeza, para demostrarse a sí mismo este punto. Voy a tratar de explicar en prosa no matemática estas ideas matemáticas que, en su forma actual, han sido demostradas en gran medida por el joven biólogo matemático americano Russell Lande. Aunque no seré tan pesimista como el propio Fisher que, en el prefacio de su libro, en 1930, escribió: «Ningún esfuerzo por mi parte podría hacer que este libro se leyese con más facilidad», sin embargo, en palabras de un amable crítico de mi primer libro, «se advierte al lector que debe ponerse su calzado mental de carrera». Mi propia comprensión de estas difíciles ideas ha representado una dura lucha. Aquí, a pesar de sus protestas, debo reconocer la ayuda de mi colega y antiguo alumno Alan Grafen, cuyas sandalias aladas mentales son notorias dentro de las de su clase, y que tiene, además, la capacidad aún más rara de quitárselas e idear la manera correcta de explicar estas cosas. Sin sus enseñanzas, no podría haber escrito la mitad de este capítulo; por ello, rehúso relegar mi agradecimiento tan sólo al prólogo.

Antes de abordar este difícil tema, debo volver atrás y decir algo sobre el origen de la idea de selección sexual. Comenzó,

como tantas cosas en este campo, con Charles Darwin. Darwin, aunque hizo hincapié en la supervivencia y la lucha por la existencia, reconoció que eran sólo los medios para conseguir un fin: la reproducción. Un faisán puede vivir hasta una edad muy madura, pero si no se reproduce no transmitirá sus caracteres. La selección favorecerá las cualidades que hacen que un animal tenga éxito en la reproducción, y la supervivencia es sólo parte de la batalla para reproducirse. En otras partes de la batalla, el éxito acompañará a aquellos que sean más atractivos para el sexo opuesto. Darwin observó que, si un faisán macho o un pavo real o un ave del paraíso adquiría un atractivo sexual, aun a costa de su propia vida, podría transmitir sus cualidades sexualmente atractivas antes de su muerte mediante una procreación sumamente eficaz. Se dio cuenta de que el abanico de la cola debía de ser un «handicap» para su dueño, en cuanto a la supervivencia, y sugirió que estaba más que contrarrestado por el atractivo sexual que le confería. Debido a su afición por las analogías con los animales domésticos, Darwin comparó al ave con un criador humano que dirigiese el curso evolutivo de unos animales domésticos siguiendo una línea de capricho estético. Podríamos compararla con la persona que selecciona las bioformas del ordenador en aquellas direcciones que tienen un atractivo estético.

Darwin se limitó a aceptar los deseos femeninos como establecidos. Su existencia era un axioma de su teoría de la selección sexual, una hipótesis previa, más que algo que se explicase por sí mismo. Por esta razón, en parte, su teoría de la selección sexual cayó en desgracia, hasta que fue rescatada por Fisher, en 1930. Desafortunadamente, muchos biólogos ignoraron o interpretaron mal a Fisher. Julian Huxley, entre otros, objetó que los deseos femeninos no constituían un fundamento legítimo para una verdadera teoría científica. Pero Fisher rescató la teoría de la selección sexual, tratando la preferencia femenina en sí misma como un objeto legítimo de la selección natural, al igual que las colas masculinas. La preferencia femenina es una manifestación del sistema nervioso femenino. Éste se desarrolla bajo la influencia de sus genes, y es probable, por tanto, que sus caracteres hayan sido influenciados por la selección actuando sobre las generaciones anteriores. Donde otros habían pensado que los ornamentos masculinos evolucionaban bajo la influencia de una preferencia femenina estática, Fisher pensó en términos de una preferencia femenina que evoluciona de manera dinámica, a la par con los ornamentos masculinos. Quizá ya se entrevea cómo vamos a unir esto con la idea de la retroalimentación positiva explosiva.

Cuando se discuten ideas teóricas complicadas, suele ser una

buena idea tener presente algún ejemplo concreto del mundo real. Utilizaré como ejemplo la cola del pájaro africano viudo de cola larga. Cualquier ornamento seleccionado sexualmente habría servido, pero sentí el deseo de resaltar los cambios y evitar al omnipresente (en discusiones sobre selección sexual) pavo real. El pájaro viudo de cola larga macho es un esbelto pájaro negro con destellos naranjas en su lomo, de un tamaño similar al de un gorrión inglés, excepto que las plumas más largas de la cola, en la época de celo, pueden llegar a tener 45,72 centímetros de largo. Se le ve con frecuencia realizando su espectacular vuelo de exhibición sobre los prados de África, girando y haciendo rizos, como un aeroplano con un largo anuncio colgando en su cola. No sorprende el hecho de que no pueda volar con tiempo húmedo. Aun así, una cola seca de esta longitud debe de ser una carga gravosa para circular en condiciones normales. Estamos interesados en explicar la evolución de esta larga cola, que presumimos ha sido un proceso evolutivo explosivo. Nuestro punto de partida, por tanto, es un pájaro ancestral sin cola larga. Imagínense la cola ancestral de unos ocho centímetros de longitud, alrededor de la sexta parte de la longitud de la cola actual de un macho en celo. El cambio evolutivo que trataremos de explicar es un aumento de seis veces la longitud de la cola.

Es un hecho obvio que, cuando medimos cualquier cosa en los animales, la mayoría de los miembros de una especie están bastante cerca de la media, con algunos individuos un poco por encima, y otros un poco por debajo de la misma. Podemos estar seguros de que había un rango de longitudes en las colas de los pájaros ancestrales, algunas más largas y otras más cortas que la media de ocho centímetros. Es correcto asumir que la longitud de la cola está gobernada por un gran número de genes, que ejercen un pequeño efecto cada uno, lo cual, sumado a los efectos de la dieta y otras variables ambientales, llega a producir una cola con la longitud que tiene en un individuo actual. Los genes múltiples cuyos efectos se suman se llaman poligenes. Muchas de nuestras propias medidas, por ejemplo, nuestra altura y peso, se encuentran afectadas por grandes números de poligenes. El modelo matemático de selección sexual que sigo más estrechamente, el de Russell Lande, es un modelo de poligenes.

Debemos dirigir ahora nuestra atención hacia las hembras, y la manera que tienen de escoger sus parejas. Podría parecer bastante sexista asumir que son las hembras las que escogen sus parejas, en lugar de los machos. Hoy día, hay buenas razones teóricas para suponer que ocurre de esta manera (véase *El gen egoísta*) y, de hecho, es así en la práctica. Es cierto que los ma-

chos modernos del pájaro viudo de cola larga atraen harenes de media docena, o así, de hembras. Esto significa que hay un *«surplus»* de machos en la población, que no se reproducen. A su vez, significa que las hembras no tienen dificultad para encontrar machos, y que están en posición de ser exigentes. Un macho tiene mucho que ganar si resulta atractivo para las hembras. Una hembra, por el contrario, tiene poco que ganar siendo atractiva para los machos, ya que, de todas maneras, las circunstancias la obligan a estar en franca demanda.

Así pues, después de aceptar la hipótesis de que son las hembras las que hacen la elección, acometamos el paso crucial que dio Fisher confundiendo a los críticos de Darwin. En lugar de estar de acuerdo con que las hembras sólo tienen caprichos, contempló la preferencia femenina como una variable influenciable desde un punto de vista genético, como cualquier otra. La preferencia femenina es una variable cuantitativa, y podemos asumir que está bajo el control de poligenes, igual que la longitud de la cola del macho. Estos poligenes pueden actuar sobre cualquier zona entre una amplia variedad de partes del cerebro femenino, o incluso sobre sus ojos; sobre cualquier cosa que tenga el efecto de alterar la preferencia femenina. La preferencia femenina, sin duda, toma en cuenta muchas partes del macho: el color de las manchas de su lomo, la forma de su pico, etc.; pero aquí estamos interesados en la evolución de la longitud de la cola del macho, y, por consiguiente, en las preferencias femeninas por las colas masculinas de diferentes longitudes. Podemos medir, por tanto, la preferencia femenina en las mismas unidades con las que medimos la longitud de la cola masculina: en centímetros. Los poligenes cuidarán que haya hembras con una preferencia por las colas masculinas mayores que la media, otras por las colas masculinas más cortas que la media, y otras, por las que tienen más o menos la longitud media.

Llegamos así a una de las intuiciones clave en esta teoría. Aunque los genes que controlan la preferencia femenina se *expresen* sólo en la conducta femenina, sin embargo, están también presentes en los cuerpos de los machos. Y, por la misma razón, los genes que controlan la longitud de la cola del macho estarán presentes en los cuerpos de las hembras, se expresen o no en estos cuerpos. La idea de los genes que no se expresan no es muy difícil de entender. Si un hombre tiene unos genes que expresan un pene largo, tiene la misma probabilidad de transmitir estos genes a su hija que a su hijo. Su hijo puede expresar estos genes, mientras que su hija, por supuesto, no lo hará, en primer lugar porque no tiene pene. Pero si el hombre tiene nietos, los hijos de su hija pueden tener la misma probabilidad de heredar su largo pene que los hijos de su hijo. Los genes pueden ser transportados en un cuerpo sin que se expresen. De la misma forma, Fisher y Lande asumen que los genes que controlan la preferencia femenina son *transportados* en los cuerpos masculinos, aun cuando sólo se *expresen* en los cuerpos femeninos. Y los genes que controlan las colas masculinas son transportados en los cuerpos femeninos, aun cuando no se expresen en ellos.

Supongamos que tenemos un microscopio especial, que nos permita observar el interior de cualquier célula de los pájaros e inspeccionar sus genes. Cojamos un macho que tenga un cola más larga que la media, y veamos los genes que hay en el interior de sus células. Si miramos primero los genes que controlan la longitud de la cola, no nos produce ninguna sorpresa descubrir que hay genes que producen un cola larga: esto es obvio, ya que *tiene* una cola larga. Pero veamos ahora los genes que controlan la *preferencia* por la cola. Aquí no tenemos ninguna clave externa, ya que estos genes sólo se expresan en las hembras. Tenemos que mirar con nuestro microscopio. ¿Qué veríamos? Veríamos genes que hacen que las hembras prefieran colas largas. En contraposición, si miramos dentro de las células de un macho que tiene una cola corta, veríamos genes que hacen que las hembras prefieran colas cortas. Éste es realmente un punto clave del argumento. El razonamiento es como sigue.

Si soy un macho con una cola larga, es muy probable que mi padre tuviese también una cola larga. Esto es simplemente herencia ordinaria. Pero también, como mi padre fue elegido como pareja por mi madre, es muy probable que mi madre prefiriese machos con cola larga. Por lo tanto, si he heredado genes de mi padre que expresan una cola larga, es probable que también haya heredado genes de mi madre que controlen la preferencia por las colas largas. Por la misma razón, si alguien hereda genes que expresan una cola corta, es probable que también herede los genes que hacen que las hembras prefieran una cola corta.

Podríamos utilizar el mismo tipo de razonamiento con las hembras. Si yo soy una hembra que prefiere los machos de cola larga, es probable que mi madre también prefiriese los machos de cola larga. Por tanto, es probable que mi padre también tuviese la cola larga, ya que fue escogido por mi madre. Si he heredado los genes que hacen que prefiera las colas largas, es probable que haya heredado también los genes que hacen que tenga una cola larga, se expresen o no en mi cuerpo femenino. Y si he heredado los genes que hacen que prefiera las colas cortas, es probable que también haya heredado los genes que hacen

que *tenga* una cola corta. La conclusión general es ésta. Cualquier individuo, sea de un sexo u otro, es probable que contenga *ambas* clases de genes que hacen que los machos tengan ciertas cualidades, *y* que las hembras *prefieran* esta cualidad, cualquiera que sea.

Así pues, los genes que expresan las cualidades masculinas, y los que hacen que las hembras prefieran esas cualidades, no están entremezclados al azar entre la población, sino que muestran un tendencia a transmitirse *juntos*. Esta «simultaneidad» que cursa bajo la denominación técnica intimidante de enlace que altera el equilibrio *(linkage disequilibrium)*, hace curiosas jugadas con las ecuaciones de los matemáticos genéticos. Tiene consecuencias extrañas y maravillosas, la menor de las cuales no es en la práctica, si Fisher y Lande tienen razón, la evolución explosiva de las colas de los pavos reales y de los pájaros viudos, y una cohorte de otros órganos de atracción. Estas consecuencias sólo pueden demostrarse matemáticamente, pero se pueden explicar con palabras, de manera que podamos tratar de captar algo del sabor del argumento matemático en un lenguaje no matemático. Todavía necesitaremos nuestros zapatos mentales para correr, aunque, en realidad, las botas para escalar constituirían una analogía más exacta. Cada paso del argumento es bastante simple, pero hay una larga serie de pasos hasta la cima de la montaña de la comprensión, y, si uno pierde alguno de los primeros, no puede dar los últimos.

Hasta ahora, hemos reconocido la posibilidad de que exista un rango completo de preferencias femeninas, desde las hembras que prefieren los machos con colas largas hasta las hembras con gustos opuestos, que prefieren machos con colas cortas. Pero si hiciésemos una encuesta entre las hembras de una población determinada, probablemente encontraríamos que la mayoría comparten los mismos gustos generales sobre los machos. Podemos expresar el *intervalo* de preferencias femeninas entre la población en las mismas unidades —centímetros— en las que expresamos el intervalo de longitudes de las colas masculinas. Y podemos expresar la preferencia *media* femenina en las mismas unidades. Podría resultar que la preferencia media femenina fuese exactamente la misma que la longitud media de la cola masculina, 8 centímetros. En este caso, la elección femenina no sería una fuerza evolutiva tendente a cambiar la longitud de la cola masculina. O podría resultar que la preferencia femenina media fuese una cola bastante más larga que la media que existe actualmente, digamos 10 centímetros, en lugar de 8. Dejando pendiente, por el momento, por qué debería existir tal discrepancia, aceptemos que hay algo y formulemos la siguiente pregunta,

que es obvia. ¿Por qué, si la mayoría de las hembras prefieren machos con colas de 10 centímetros, la mayoría de éstos tienen, en realidad, colas de 8 centímetros? ¿Por qué la longitud media de la cola no varía hacia los 10 centímetros bajo la influencia de la selección sexual femenina? ¿Cómo puede haber una discrepancia de 2 centímetros entre la longitud media de la cola preferida y la longitud media actual de la misma?

La respuesta es que la preferencia femenina no es la única clase de selección que influye en la longitud de la cola masculina. Las colas cumplen una función importante durante el vuelo, y una cola que fuese demasiado larga o demasiado corta reduciría la eficiencia del mismo. Por otra parte, una cola larga consume más energía para su transporte, y también para su desarrollo. Los machos con colas de 10 centímetros de longitud atraerían bien a las hembras, pero el precio que pagarían sería un vuelo menos eficaz, un mayor consumo de energía y una mayor vulnerabilidad con respecto a sus depredadores. Podemos expresarlo diciendo que hay una cola con una longitud *óptima* desde un punto de vista utilitario, diferente de la longitud óptima seleccionada sexualmente: una cola con una longitud ideal desde el punto de vista de los criterios utilitarios ordinarios: una cola con una longitud que sería ideal desde todos los puntos de vista, aparte del de atraer hembras.

¿Cabría esperar que la longitud media actual de la cola masculina, 8 centímetros en nuestro hipotético ejemplo, fuese la misma que la óptima desde un punto de vista utilitario? No, deberíamos pensar que la longitud óptima, desde un punto de vista utilitario, tuviera que ser menor, digamos 5 centímetros. La razón es que la longitud media actual de la cola de 8 centímetros es el resultado de un compromiso entre la selección utilitaria, que tiende a hacer las colas más cortas, y la selección sexual, que tiende a hacerlas más largas. Podemos suponer que, si no hubiese necesidad de atraer hembras, la longitud media de la cola se reduciría hasta 5 centímetros. Si no hubiese necesidad de preocuparse por la eficiencia del vuelo y el consumo de energía, la longitud media de la cola se dispararía hacia los 10 centímetros. La media actual de 8 centímetros es el resultado de un compromiso.

Dejaremos a un lado la cuestión de *por qué* las hembras podrían estar de acuerdo en preferir una cola que se aparta de la longitud óptima, desde un punto de vista utilitario. A primera vista, la idea misma parece estúpida. Las hembras influidas por la moda, con una preferencia por las colas más largas de lo que deberían ser de acuerdo con unos buenos criterios de diseño, tendrán unos hijos mal diseñados, ineficaces, que volarán con

torpeza. Cualquier mutante femenino que tenga una preferencia no influenciada por la moda por machos de cola más corta, en especial una hembra mutante, cuyo gusto en colas coincida con el óptimo desde un punto de vista utilitario, producirá hijos eficientes, bien diseñados para el vuelo, que seguramente dejarían fuera de competición a los hijos de sus rivales más en consonancia con la moda. ¡Ah!, pero he aquí el sarcasmo. Está implícito en mi metáfora de la «moda». Los hijos de la hembra mutante podrán ser eficientes en el vuelo, pero no serán tan atractivos para la mayoría de las hembras de la población. Atraerán sólo a una minoría de hembras, aquellas que desafían la moda; y las hembras en minoría, por definición, son más difíciles de encontrar que las hembras en mayoría, por la sencilla razón de que están diluidas en el territorio. En una sociedad donde sólo uno de cada seis machos se empareja, y donde los machos afortunados tienen grandes harenes, el que complazca la mayoría de los gustos de las hembras tendrá unos beneficios enormes, beneficios capaces de contrapesar los costes utilitarios en energía y en eficiencia durante el vuelo.

Aun así, el lector puede quejarse de que todo el argumento esté basado en un supuesto arbitrario. Como la mayoría de las hembras prefieren colas largas no utilitarias, admitirá el lector, todo lo demás es consecuencia de esto. Pero *¿por qué* acaeció esta preferencia mayoritaria femenina? ¿Por qué la mayoría de las hembras no prefieren colas *más pequeñas*, o que tengan la misma longitud que las óptimas desde un punto de vista utilitario? ¿Por qué no puede coincidir la moda con la utilidad? La respuesta es que puede suceder cualquiera de estas cosas, y en muchas especies es probable que coincidan. Mi caso hipotético de hembras que prefieren colas largas es, por supuesto, arbitrario. Pero *cualquiera que sea* la preferencia de la mayoría femenina, sin importar su arbitrariedad, debe de haber existido una tendencia a ser mantenida por la selección o incluso bajo algunas condiciones, actualmente magnificadas, exageradas. Es en este punto del argumento donde la falta de justificación matemática a mi favor llega a ser realmente notable. Podría invitar al lector a aceptar, simplemente, que el razonamiento matemático de Lande demuestra este punto, y dejarlo aquí. Sin embargo, intentaré explicar parte de la idea.

La clave del argumento descansa en el punto que establecimos antes sobre el «enlace que altera el equilibrio», la «simultaneidad» de los genes para producir colas de una longitud determinada —cualquiera— y los genes correspondientes, que hacen preferir colas de esta misma longitud. Podemos imaginarnos el «factor de simultaneidad» como una cantidad mensurable. Si es

muy alto, significa que el conocimiento de los genes que controlan la longitud de la cola de un individuo nos permite predecir, con bastante exactitud, la preferencia controlada por sus genes, y viceversa. Por el contrario, si el factor de simultaneidad es bajo, significa que el conocimiento de los genes de un individuo en uno de los dos departamentos —preferencia o longitud de la cola— nos da sólo una ligera pista sobre los genes del otro departamento.

Lo que afecta a la magnitud del factor de unión es la intensidad de la preferencia de las hembras, la tolerancia que tienen sobre lo que ven como machos imperfectos; qué magnitud de variación en la longitud de la cola masculina está gobernada por genes en contraposición a los factores ambientales; etc. Si, como resultado de todos estos efectos, el factor de simultaneidad —el estrechamiento de la unión de los genes que controlan la longitud de la cola y los que controlan la preferencia sobre la misma— es muy fuerte, podemos deducir la consecuencia siguiente. Cada vez que se elige un macho a causa de su cola larga, no sólo se eligen genes que controlan colas largas. Al mismo tiempo, a causa del acoplamiento debido a la «simultaneidad», se eligen también los genes que hacen *preferir* las colas largas. Esto significa que los genes que hacen que las hembras escojan colas masculinas de una longitud determinada están, en efecto, *escogiendo copias de sí mismos.* Éste es el ingrediente esencial de un proceso que se refuerza a sí mismo: tiene un impulso propio que se mantiene a sí mismo. Después de haber sido iniciado por la evolución en una dirección determinada, este impulso puede, por sí solo, hacer que persista en la misma dirección.

Otra forma de verlo es en términos de lo que se conoce como el «efecto de la barba verde». Se trata de una especie de chiste biológico académico. Es puramente hipotético, pero resulta instructivo. Originalmente, se propuso como una manera de explicar el principio fundamental implícito en la teoría de la selección de linajes, de W. D. Hamilton, que traté con detalle en *El gen egoísta.* Hamilton, en la actualidad uno de mis colegas en Oxford, mostró que la selección natural favorece a los genes que se comportan de una manera altruista hacia sus parientes cercanos, simplemente porque hay una elevada probabilidad de que existan copias idénticas de estos genes en los cuerpos de sus parientes. La hipótesis de la «barba verde» recalca el mismo punto de una manera más general, aunque menos práctica. El parentesco, postula el argumento, es sólo una manera posible en la que los genes pueden, en efecto, localizar copias de sí mismos en otros cuerpos. En teoría, un gen podría localizar copias de sí mismo por medios más directos. Supongamos

que se produjera la aparición de un gen que tuviese los dos efectos siguientes (los genes que producen dos o más efectos son frecuentes): hacer que sus dueños tengan un «distintivo» conspicuo, como una barba verde, y afectar a sus cerebros de forma que se comporten de manera altruista hacia los individuos que tienen barba verde. Coincidencia muy improbable, hay que admitirlo, pero que, si se produjera, la consecuencia evolutiva sería clara. El gen altruista de la barba verde mostraría una tendencia a verse favorecido por la selección natural, por la misma razón que los genes que controlan el altruismo hacia su descendencia o hacia sus hermanos. Cada vez que un individuo de barba verde ayudase a otro, el gen que transmite este altruismo discriminante estaría favoreciendo a una copia de sí mismo. La diseminación del gen que controla la barba verde sería automática e inevitable.

Nadie cree, en realidad, yo me incluyo, que el efecto de la barba verde se encuentre en la naturaleza en esta forma ultrasimple. En la naturaleza, los genes discriminan a favor de sus propias copias mediante marcas menos específicas pero más verosímiles que las barbas verdes. Esta etiqueta es el parentesco. El concepto de «hermano» o, en la práctica, «el que se ha formado en el nido donde yo acabo de echar las plumas», es una etiqueta estadística. Cualquier gen que haga que los individuos se comporten de una manera altruista con los portadores de esta etiqueta tiene una gran probabilidad estadística de estar ayudando a copias de sí mismo: porque los hermanos tienen una gran probabilidad estadística de compartir genes. La teoría de Hamilton, de la selección de linajes, puede verse como una forma en la que sea posible el efecto de la barba verde. Hay que recordar, dicho sea de paso, que no hay aquí ninguna sugerencia de que los genes «quieran» ayudar a las copias de sí mismos. Sólo que cualquier gen que ejerza este *efecto* mostrará una tendencia, se quiera o no, a aumentar su número en la población.

El parentesco puede contemplarse así como una manera en la que puede ser posible algo como el efecto de la barba verde. La teoría de la selección sexual de Fisher puede explicarse como otra manera en la que este efecto fuera posible. Cuando las hembras de una población muestran una preferencia marcada por unas características masculinas, se sigue, por el mismo razonamiento que acabamos de hacer, que cada cuerpo masculino tendrá tendencia a contener copias de los genes que hacen que las hembras prefieran sus propias características. Si un macho ha heredado una cola larga de su padre, es probable que también haya heredado de su madre los genes que la hicieron elegir la cola larga de su padre. Si tiene una cola corta, es probable que

tenga los genes que hacen que las mujeres prefieran las cortas. Así pues, cuando una hembra ejercita su elección de un macho, cualquiera que sea la dirección de su preferencia, es probable que los genes que inclinan su elección estén seleccionando copias de sí mismos en los machos. Lo hacen utilizando como marca la longitud de la cola del macho, en una versión más compleja que la del gen hipotético de la barba verde, que la utiliza como etiqueta.

Si la mitad de las hembras de una población prefiriesen machos de cola larga, y la otra mitad machos de cola corta, los genes que controlan la elección femenina estarían escogiendo copias de sí mismos, pero no existiría ninguna tendencia para que resultase uno u otro tipo de cola. La población tendería a dividirse en dos grupos: uno de colas largas, que preferiría las colas largas, y otro de colas cortas, que preferiría las colas cortas. Pero cualquier división de la opinión femenina en dos es una situación inestable. En cuanto comenzara a acumularse una mayoría, *aunque fuese ligera*, entre las hembras con un tipo de preferencia, esta mayoría se reforzaría en las generaciones posteriores. El motivo es que los machos preferidos por las hembras de la escuela de pensamiento minoritario tendrían más dificultad para encontrar pareja; y las hembras de la escuela de pensamiento minoritario procrearían hijos que tendrían cierta dificultad para encontrar pareja, de forma que tendrían menos nietos. Siempre que las minorías pequeñas muestren tendencia a ser aún más pequeñas, y las mayorías pequeñas a ser más grandes, tendremos una receta para la retroalimentación positiva: «A todo aquel que tenga le será dado, y nadará en la abundancia; pero a aquel que no tiene se le quitará incluso lo que no tenía.» Siempre que tengamos un equilibrio inestable, arbitrario, con unos comienzos aleatorios, que se refuercen a sí mismos. Cuando cortamos el tronco de un árbol, no tenemos la certeza de si el árbol caerá hacia el norte o hacia el sur; pero, después de permanecer equilibrado durante un tiempo, una vez que comienza a caer en una u otra dirección, nada puede hacerle volver atrás.

Ajustémonos más nuestras botas de escalar, mientras nos preparamos para clavar otro pitón. Recordemos que la selección hecha por las hembras atrae las colas masculinas en una dirección, mientras la selección «utilitaria» las atrae en otra («atraer», por supuesto, en sentido evolutivo), siendo la longitud media actual de la cola un compromiso entre ambas atracciones. Reconozcamos ahora una magnitud denominada «discrepancia en la elección». Es la diferencia entre la longitud media actual de la cola de los machos en la población, y la longitud «ideal» de

la cola, que preferiría, en realidad, la media de la población femenina. Las unidades en las que se mide esta discrepancia son arbitrarias, como lo son las escalas de temperatura en grados Farenheit o en centígrados. Del mismo modo que la escala en centígrados encuentra conveniente fijar su punto cero en la temperatura de congelación del agua, nosotros encontramos conveniente fijar nuestro punto cero donde la atracción ejercida por la selección sexual equilibra exactamente la atracción que ejerce en sentido opuesto la selección utilitaria. En otras palabras, una discrepancia en la elección de cero significa que el cambio evolutivo llegará hasta la mitad, porque las dos clases de selección se contrarrestan entre sí.

Cuanto mayor sea la discrepancia en la elección, mayor será la «atracción» evolutiva ejercida por las hembras en contra de la selección natural utilitaria. No estamos interesados en el valor absoluto de esta discrepancia en un momento concreto, sino en el *cambio* que experimenta a lo largo de sucesivas generaciones. Como resultado de una discrepancia determinada, las colas serán más largas, y al mismo tiempo (recordar que los genes que controlan la selección de colas largas están siendo seleccionados de acuerdo con los genes que controlan la producción de colas largas), la cola «ideal» preferida por las hembras se alargará también. Después de una generación con esta doble elección, la longitud media de la cola y la longitud media preferida de la cola se habrán alargado, pero ¿cuál ha aumentado más? Es otra manera de preguntar qué ocurrirá con la discrepancia en la elección.

La discrepancia en la elección podría permanecer igual (si la longitud media de la cola y la longitud media preferida aumentasen lo mismo). Podría reducirse (si la longitud media de la cola aumentase más que la longitud media preferida). O, finalmente, podría incrementarse (si la longitud media de la cola aumentase algo, pero la longitud media preferida aumentase más aún). Podemos ver que, si la discrepancia en la elección se hace más pequeña mientras las colas se hacen más grandes, la longitud de la cola evolucionará hacia un equilibrio estable. Pero si la discrepancia se hace *más grande* mientras las colas aumentan de tamaño, las generaciones futuras verían, en teoría, colas disparadas con una velocidad creciente. Esto es, sin duda, lo que Fisher debió de calcular antes de 1930, aunque sus breves palabras publicadas no fuesen comprendidas con claridad por sus contemporáneos.

Consideremos, en primer lugar, el caso en que la discrepancia en la elección se reduce en el transcurso de las generaciones. Con el tiempo, llegará a ser tan pequeña que la atracción de la preferencia femenina en una dirección estará totalmente

equilibrada por la atracción de la selección utilitaria en la otra. El cambio evolutivo cesará, y se puede decir entonces que el sistema se encuentra en un estado de equilibrio. La interesante cuestión que probó Lande es que, por lo menos bajo ciertas condiciones, no hay un solo punto de equilibrio sino muchos (teóricamente, un número infinito representado gráficamente en una línea recta, pero ¡aquí están de nuevo las matemáticas!). No hay un solo punto de equilibrio sino muchos: para cualquier intensidad de atracción de la selección utilitaria en una dirección, la intensidad de la preferencia femenina evoluciona hasta alcanzar un punto donde se equilibran.

Así pues, si las condiciones son tales que la discrepancia en la elección tiende a reducirse en el transcurso de las generaciones, la población llegará a establecerse en el punto de equilibrio «más cercano». La atracción de la selección utilitaria en una dirección será contrarrestada por la atracción de la selección femenina en la otra, y las colas de los machos conservarán la misma longitud, sin importar cuál sea. El lector podrá reconocer aquí un sistema de retroalimentación negativa, pero un tipo de sistema un tanto extraño. Se puede ver que se trata de un sistema de retroalimentación negativa, por lo que sucede si se le «altera» situándolo fuera de su «punto de ajuste». Si se altera la temperatura de una habitación abriendo una ventana, por ejemplo, el termostato responderá poniendo en marcha la producción de calor, para compensar.

¿Cómo podríamos alterar el sistema de selección sexual? Recordemos que estamos hablando de la escala de tiempo evolutiva, de manera que es difícil realizar el experimento —el equivalente a abrir la ventana— y vivir para ver los resultados. Pero, sin duda, en la naturaleza, el sistema se altera con frecuencia, por ejemplo, por fluctuaciones espontáneas, aleatorias, en el número de machos debido a la casualidad, a sucesos afortunados o desafortunados. Siempre que así sucede, y en las condiciones que hemos tratado hasta ahora, la combinación de la selección utilitaria y la selección sexual harán que la población se dirija al punto de equilibrio más próximo del conjunto. Es probable que no sea el mismo de antes, sino otro, un poco más alto, o más bajo, a lo largo de la línea de puntos de equilibrio. Una desviación hacia arriba significa que las colas se alargarán más; teóricamente, no hay límite en cuanto a longitud. Una desviación hacia abajo significa que las colas se acortarán más, siguiendo la línea hasta una longitud cero.

La analogía del termostato se utiliza con frecuencia para explicar la idea del punto de equilibrio. Podemos desarrollar la analogía para explicar una idea más difícil, de una *línea* de equili-

brio. Supongamos que una habitación tiene un dispositivo de calefacción y otro de refrigeración, cada uno con su propio termostato. Ambos están regulados para mantener la habitación a una temperatura fija, de 21 ºC. Si la temperatura desciende por debajo de los 21 ºC, la calefacción se encenderá y la refrigeración se apagará automáticamente. Si la temperatura se eleva por encima de los 21 ºC, la refrigeración se encenderá y la calefacción se apagará automáticamente. El análogo de la longitud de la cola del pájaro viudo no es la temperatura (que permanece más o menos constante, a 21 ºC) sino el consumo total de electricidad. Lo importante es que hay muchas formas de conseguir la temperatura deseada. Puede conseguirse trabajando intensamente ambos dispositivos, el calentador expulsando aire caliente y la refrigeración trabajando para neutralizar el calor. Puede conseguirse haciendo que el calentador produzca un poco menos de calor y, consecuentemente, la refrigeración trabaje con menos intensidad para equilibrarlo. O puede conseguirse trabajando poco ambos dispositivos. Obviamente, esta última sería la solución más deseable, desde el punto de vista de la factura de la luz pero, en lo que se refiere al tema de mantener una temperatura fija de 21 ºC, cualquier ritmo de trabajo, entre una larga serie, sería igualmente satisfactorio. Tenemos una *línea* de puntos de equilibrio, en lugar de un solo punto. Dependiendo de detalles sobre cómo fue proyectado el sistema, las demoras en el mismo y otras cosas que preocupan a los ingenieros, es teóricamente posible, para un ritmo de consumo eléctrico determinado, desviarse por encima y por debajo de la línea de puntos de equilibrio, mientras la temperatura permanece constante. Si la temperatura de la habitación desciende un poco por debajo de los 21 ºC volverá a funcionar, pero no necesariamente con la misma combinación de ritmos de trabajo entre las unidades de calentamiento y refrigeración. Pueden regresar a un punto de equilibrio distinto a lo largo de la línea de equilibrio.

En términos de ingeniería práctica, sería muy difícil proyectar una habitación de forma que existiese una verdadera línea de equilibrio. Es probable que en la práctica la línea se «redujese a un punto». Asimismo, el argumento de Russell Lande, sobre la existencia de una línea de equilibrio en la selección sexual, descansa sobre hipótesis que puede que no sean ciertas en la naturaleza. Asume, por ejemplo, que hay un suministro constante de nuevas mutaciones. Que el acto de la elección, por parte de una hembra, es enteramente gratuito. Si este supuesto es infringido, y puede serlo, la «línea» se reducirá a un solo punto de equilibrio. Pero, de cualquier manera, hasta ahora sólo hemos discutido el caso en que la discrepancia en la elección se torna

más pequeña, en el transcurso de generaciones sucesivas de selección. Con otras condiciones, la discrepancia en la elección puede llegar a ser mayor.

Hace rato que estamos tratando este tema, de forma que recordemos lo que significa. Tenemos una población cuyos machos están sufriendo la evolución de algunas de sus características, digamos, la longitud de la cola en los pájaros viudos, bajo la influencia de las preferencias femeninas que tiende a que se produzcan colas más largas y la selección utilitaria que tiende a que se produzcan colas más cortas. La razón por la que hay un impulso en la evolución hacia las colas más largas es que, siempre que una hembra elige un macho del tipo que a ella «le gusta», lo hace debido a la asociación no aleatoria de genes, seleccionando copias de los mismos genes que hacen que realice su elección. De ese modo, en la siguiente generación, no sólo los machos mostrarán una tendencia a tener colas más largas, sino que las hembras mostrarán también una preferencia más acusada por las colas largas. No es obvio cuál de estos dos procesos incrementales tiene un ritmo más elevado, generación por generación. Hasta ahora, sólo hemos considerado el caso en el que la longitud de la cola aumenta más rápido, en cada generación, que la preferencia. Consideremos el caso contrario, en que la preferencia aumenta a un ritmo aún mayor, en cada generación, de lo que lo hace la longitud de la cola. En otras palabras, el caso en el que la discrepancia en la elección se hace mayor en el transcurso de las generaciones, no menor, como en el párrafo anterior.

Aquí, las consecuencias teóricas son aún más grotescas. En lugar de una retroalimentación negativa, tenemos una retroalimentación positiva. Según transcurren las generaciones, las colas se hacen más largas, pero el deseo femenino de colas más largas aumenta con un ritmo más elevado. Esto significa que, en teoría, las colas se harán aún más largas, a un ritmo progresivamente acelerado, con el paso de las generaciones. Teóricamente, las colas continuarán creciendo, aunque tengan más de 10 kilómetros de longitud. En la práctica, por supuesto, las reglas del juego habrán cambiado mucho antes de que se alcancen longitudes tan absurdas, como nuestra máquina a vapor con su controlador invertido de Watt no habría alcanzado *realmente* un millón de revoluciones por segundo. Pero aunque hemos moderado las conclusiones del modelo matemático en situaciones extremas, éstas pueden ser aún correctas a lo largo de un intervalo de condiciones prácticamente posibles.

Ahora, cincuenta años después, podemos comprender qué quería decir Fisher, cuando afirmaba que «es fácil ver que la

velocidad de desarrollo será proporcional al desarrollo alcanzado, y que, por tanto, aumentará con el tiempo de una manera exponencial o en progresión geométrica». Su razonamiento era el mismo que el de Lande, cuando dijo: «Las dos características implicadas en este tipo de proceso, el desarrollo del plumaje en los machos y la preferencia sexual para este desarrollo en las hembras, deben avanzar juntas y, en tanto el proceso no se vea frenado por una intensa selección de signo contrario, avanzará a una velocidad progresiva.»

El hecho de que Fisher y Lande llegasen mediante un razonamiento matemático a la misma intrigante conclusión no significa que su teoría sea un reflejo correcto de lo que ocurre en la naturaleza. Podría ser, como ha dicho el genetista de Cambridge, Peter O'Donald, una de las principales autoridades en teoría de la selección sexual, que la característica de descontrol del modelo de Lande estuviese «construida», en sus supuestos iniciales, de manera que no ayudaría el que emergiera de una manera bastante aburrida al final del razonamiento matemático. Algunos teóricos, incluyendo a Alan Grafen y W. D. Hamilton, prefieren otra teoría alternativa, en la que la elección hecha por la hembra tenga realmente un efecto beneficioso sobre su progenie, en sentido utilitario, eugénico. La teoría en la que están trabajando juntos supone que las hembras actúan como médicos, escogiendo aquellos pájaros que son menos susceptibles a los parásitos. Un vistoso plumaje, de acuerdo con esta teoría característicamente ingenua de Hamilton, sería la forma masculina de advertir de forma conspicua sobre su salud.

Se necesitaría demasiado tiempo para explicar en su totalidad la importancia teórica de los parásitos. Brevemente, el problema de todas las teorías «eugénicas» de elección femenina ha sido el siguiente. Si las hembras pudiesen elegir los machos con los mejores genes, su éxito reduciría el rango de elección en el futuro: si sólo hubiese buenos genes, no tendría objeto escoger. Los parásitos eliminan esta objeción teórica. La razón, de acuerdo con Hamilton, es que los parásitos y sus huéspedes se encuentran disputando una carrera de armamentos *cíclica* que no tiene fin. Eso significa, a su vez, que los «mejores» genes de una generación cualquiera de pájaros no son los mismos que los de las generaciones futuras. Lo que se necesita para vencer a la generación actual de parásitos no es bueno contra la generación siguiente de parásitos en evolución. Por tanto, habrá siempre algunos machos que estarán genéticamente mejor equipados que otros para vencer a la generación de parásitos presente. Las hembras, por tanto, podrían beneficiar a su descendencia escogiendo los machos más sanos de la generación en curso. El

único criterio *general* que podrían utilizar las sucesivas generaciones de hembras son los indicadores que utilizaría cualquier experto: ojos vivos, plumaje brillante, etc. Sólo los machos genuinamente sanos pueden exhibir estos síntomas de salud, de forma que la selección favorecería a aquellos que los exhiban en su totalidad, e incluso los exageren en forma de largas colas y extensos abanicos.

Pero la teoría del parásito, aunque pueda ser correcta, está fuera del tema de mi capítulo sobre «explosiones». Volviendo a la teoría del descontrol de Fisher/Lande, lo que se necesita es una evidencia en los animales reales. ¿Cómo podríamos buscarla? ¿Qué métodos deberíamos utilizar? Un enfoque prometedor es el que realizó Malte Andersson, de Suecia. Trabajó con el mismo pájaro que estoy utilizando aquí para tratar estas ideas teóricas, el pájaro viudo de cola larga, y lo estudió en su medio ambiente natural, en Kenia. Los experimentos de Andersson fueron posibles gracias a un reciente avance tecnológico: un superpegamento. Razonó como sigue. Si es cierto que la longitud actual de la cola de los machos es un compromiso entre la longitud óptima desde un punto de vista utilitario, y lo que las hembras quieren en realidad, debería ser posible fabricar un macho muy atractivo, dándole una cola con una longitud extra. Aquí es donde entra en juego el superpegamento. Describiré con pocas palabras el experimento de Andersson, porque es un claro ejemplo de diseño experimental.

Andersson cazó 36 pájaros viudos machos, y los dividió en nueve grupos de cuatro. Cada grupo fue tratado de la misma manera. Se cortó la cola a uno de sus miembros (elegidos al azar, para evitar cualquier inclinación inconsciente) hasta dejarla con una longitud de 14 centímetros (unas 51/2 pulgadas). El trozo cortado se pegó, con el superpegamento, al extremo de la cola del segundo miembro del grupo. Así, el primero tenía una cola acortada artificialmente, y el segundo una cola alargada, también de una manera artificial. Al tercer pájaro se le dejó con su cola intacta, para usarlo como testigo. Al cuarto pájaro se le dejó también con la cola de la misma longitud, pero retocada. Se cortaron los extremos de las plumas y se volvieron a pegar de nuevo. Esto puede parecer un ejercicio inútil, pero es un buen ejemplo del cuidado que hay que tener al diseñar los experimentos. Podría suceder que el hecho de tener las plumas de la cola manipuladas, o el hecho de ser cazados y manipulados por una persona, afectasen al pájaro, más que el cambio de longitud. El cuarto miembro del grupo era un «control» de estos efectos.

La idea consistía en comparar el éxito de emparejamiento de cada pájaro con el de sus colegas tratados dentro de cada

grupo de cuatro. Después de ser tratados de una de estas cuatro maneras, se permitió que cada macho ocupase su territorio en su residencia anterior. Aquí reasumieron su actividad normal de atraer hembras a su territorio, para emparejar, construir un nido y poner huevos. La cuestión era qué miembro de cada grupo tendría más éxito atrayendo hembras. Andersson lo midió, no por una observación literal de las hembras, sino esperando y contando el número de nidos que contenían huevos en el territorio de cada macho. Lo que encontró fue que los machos con colas alargadas artificialmente atraían casi cuatro veces más hembras que los machos con colas acortadas de forma artificial. Los pájaros con colas de una longitud normal, natural, tuvieron un éxito intermedio.

Los resultados fueron analizados estadísticamente, para excluir que se debieran sólo al azar. La conclusión fue que, si el único criterio fuese atraer hembras, los machos estarían mejor servidos con colas más largas que las que tienen actualmente. En otras palabras, la selección sexual está tirando constantemente de las colas (en sentido evolutivo) para hacerlas más largas. El hecho de que las colas reales sean más cortas de lo que preferirían las hembras sugiere que debe de haber alguna otra presión selectiva que las mantiene más cortas. Ésta es la selección «utilitaria». Los machos con colas muy largas tienen más probabilidades de morir que los que tienen colas de una longitud media. Desafortunadamente, Andersson no tuvo tiempo para seguir el destino posterior de sus machos transformados. Si lo hubiese tenido, la predicción habría sido que los machos con plumas extras pegadas a su cola deberían haber muerto, por término medio, más jóvenes que los machos normales, probablemente a causa de su mayor vulnerabilidad frente a los depredadores. Por otra parte, cabría esperar que los machos con colas acortadas artificialmente viviesen más tiempo que los normales. El motivo es que se supone que la longitud normal es un compromiso entre el punto óptimo de la selección sexual y el punto óptimo de la selección utilitaria. Presumiblemente, los pájaros con colas acortadas artificialmente están más cerca del punto óptimo utilitario, y por lo tanto deberían vivir más tiempo. Sin embargo, hay demasiadas hipótesis en todo esto. Si la principal desventaja de una cola larga, desde un punto de vista utilitario, fuese el coste económico de su desarrollo, más que el peligro de morir después de su crecimiento, no esperaríamos que los machos a los que se les suministró una cola extralarga en bandeja, como regalo de Andersson, muriesen particularmente jóvenes, como resultado de la misma.

He escrito lo anterior como si la preferencia femenina mos-

trase una tendencia a tirar de las colas y otros ornamentos para que se hagan más grandes. En teoría, como vimos, no hay razón por la que la preferencia femenina no pudiera tirar en dirección opuesta, por ejemplo, en dirección de un progresivo acortamiento, más que un alargamiento, de las colas. El abadejo común tiene una cola tan corta y dura que uno está tentado a preguntarse si es, quizá, más corta de lo que «debería» ser por motivos estrictamente utilitarios. La competitividad entre los abadejos machos es intensa, como puede deducirse del tono desproporcionado de sus cantos. Este canto está destinado a ser muy costoso, y se ha llegado a conocer algún caso de un abadejo macho que cantó, literalmente, hasta la muerte. Los machos afortunados tienen más de una hembra en su territorio, como los pájaros viudos. En un clima tan competitivo, cabría esperar que funcionase la retroalimentación positiva. ¿Podría representar la corta cola del abadejo el producto final de un proceso incontrolado de reducción evolutiva?

Dejando a los abadejos a un lado, los abanicos de los faisanes, las colas de los pájaros viudos y las de las aves del paraíso, con su recargada extravagancia, pueden contemplarse como productos finales de una evolución explosiva, en espiral, debida a una retroalimentación positiva. Fisher y sus modernos sucesores nos han mostrado cómo podría haber sucedido esto. ¿Está ligada esta idea a la selección sexual, o podemos encontrar analogías convincentes en otras clases de evolución? Merece la pena planteárselo, aunque sólo sea porque hay aspectos de nuestra propia evolución que contienen más de una sugerencia sobre su naturaleza explosiva, por ejemplo, el aumento extremadamente rápido de nuestros cerebros durante los últimos millones de años. Se ha sugerido que se debe a la selección sexual, siendo la actividad cerebral un carácter sexualmente atractivo (o algunas de sus manifestaciones, como la capacidad de recordar los pasos de una larga y compleja danza ritual). Pero también podría ser que el aumento de tamaño del cerebro hubiese estallado bajo la influencia de una clase de selección diferente, análoga pero no idéntica a la selección sexual. Pienso que es útil distinguir dos niveles de analogías posibles con la selección sexual: uno ligero y otro marcado.

La analogía ligera equivale a lo siguiente. Cualquier proceso evolutivo, en el que el producto final de una etapa prepara el escenario para el paso siguiente, es potencialmente progresivo, algunas veces de una manera explosiva. Ya nos hemos encontrado esta idea en el capítulo anterior, en forma de «carreras de armamentos». Cada mejora evolutiva en el diseño de un depredador cambiará la presión sobre sus presas, haciendo que éstas

mejoren para evitarlo. Esto ejercerá presión, a su vez, sobre los depredadores para que mejoren, de forma que tendremos una espiral que aumenta de manera progresiva. Como vimos, es probable que el resultado sea que ni los depredadores ni las presas disfrutarán de un nivel mayor de éxitos, porque sus enemigos mejoran al mismo tiempo. Sin embargo, tanto unos como otros se van *equipando* mejor progresivamente. Ésa es la analogía ligera con la selección sexual. La analogía marcada implica que la esencia de la teoría de Fisher/Lande es un fenómeno similar al de la «barba verde», por el cual los genes que controlan la elección femenina tenderían automáticamente a escoger copias de *sí mismos*, un proceso con tendencia a volverse explosivo. No está claro que haya otros ejemplos de esta clase de fenómenos, con excepción de la selección sexual.

Sospecho que un buen lugar para buscar analogías con la evolución explosiva del tipo de la selección sexual es la evolución cultural humana. Porque aquí, de nuevo, tiene importancia la elección caprichosa, y ésta puede estar sujeta a la «moda» o al efecto de «la mayoría siempre gana». Una vez más, hay que recordar el aviso con el que empecé este capítulo. La «evolución» cultural no es del todo una evolución, si somos minuciosos y puristas con la utilización de las palabras, pero puede haber suficientes puntos en común entre ellas como para justificar una comparación de los principios. Al hacerlo no debemos tomarnos en serio las diferencias. Apartemos estos temas del camino, antes de volver a la cuestión de las explosiones en espiral.

Con frecuencia se ha señalado, cualquier tonto puede verlo, que hay algo casi evolutivo en muchos aspectos de la historia humana. Si se coge una muestra de un aspecto determinado de la vida humana a intervalos regulares, por ejemplo, el estado de conocimientos científicos, la clase de música que se toca, la moda en el vestir, o los vehículos de transporte, con intervalos de un siglo o quizás una década, encontraremos *tendencias*. Si tenemos tres muestras, recogidas en tres momentos sucesivos *A*, *B* y *C*, decir entonces que existe una tendencia sería decir que la medida tomada en el tiempo *B* es intermedia entre las medidas tomadas en los tiempos *A* y *C*. Aunque hay excepciones, todos estarán de acuerdo en que esta clase de tendencias caracterizan muchos aspectos de la vida civilizada. Se admite que la dirección de las tendencias puede invertirse (por ejemplo, la longitud de las faldas), pero esto también es cierto en la evolución genética.

Muchas tendencias, en especial las tendencias en tecnologías útiles como contraposición a las modas frívolas, sin entrar en discusión sobre los juicios de valor, son identificadas como *mejoras*. No cabe duda, por ejemplo, de que los vehículos de transporte han mejorado, de manera progresiva y sin retrocesos, a lo largo de los últimos doscientos años, pasando del arrastre de caballos a los vehículos a vapor, y culminando en los aviones supersónicos. Utilizo la palabra mejora de una forma neutral. No quiero decir que todo el mundo esté de acuerdo en que la calidad de vida ha mejorado como resultado de estos cambios; personalmente, lo dudo a menudo. Tampoco quiero negar la visión popular de que se han *rebajado* los estándares de la mano de obra, según se ha ido reemplazando la habilidad artesanal por la producción en cadena. Pero observando los medios de *transporte*, sólo desde el punto de vista del transporte, lo que significa ir de una parte del mundo a otra, no puede haber discusión sobre la existencia de una tendencia histórica hacia una mejora, aunque sólo sea en la velocidad. De igual manera, no puede negarse que ha habido, a lo largo de una escala de tiempo de décadas, una mejora progresiva en la calidad de los equipos amplificadores de sonido de alta fidelidad, aunque estemos de acuerdo en que el mundo sería un sitio más agradable si no se hubiesen inventado nunca. No es que hayan cambiado los gustos; es un hecho objetivo, mensurable, que la fidelidad de la reproducción es ahora mejor de lo que era en 1950, y en 1950 era mejor que en 1920. No puede negarse que la calidad de imagen es mejor en un equipo moderno de televisión que en los equipos primitivos, aunque, por supuesto, lo mismo pueda no ser cierto de la calidad de los espectáculos transmitidos. La calidad de las máquinas para matar en la guerra muestra una tendencia dramática hacia la mejora: son capaces de matar más gente más rápido, según pasan los años. El sentido en el que este ejemplo no representa una mejora es demasiado obvio para insistir en el tema.

No hay duda, en un estricto sentido técnico, de que las cosas mejoran con el transcurso del tiempo. Pero esto es sólo cierto de una forma obvia en las cosas técnicamente útiles, como los aeroplanos y los ordenadores. Hay otros muchos aspectos de la vida humana que muestran verdaderas tendencias, sin que éstas representen mejoras, en un sentido obvio. Los idiomas evolucionan en el sentido de que muestran tendencias, divergen y, según pasan los siglos después de su divergencia, llegan a ser más y más ininteligibles. Las numerosas islas del Pacífico suministran un hermoso taller para el estudio de la evolución del lenguaje. Los idiomas de las distintas islas son similares, y sus diferencias pueden medirse con precisión, por el número de palabras que difieren entre sí, medición bastante análoga a las medidas taxonómicas moleculares que expondremos en el capítulo

10. Puede trazarse un gráfico con las diferencias entre idiomas, medidas en número de palabras divergentes, frente a la distancia entre islas, medidas en kilómetros, y el resultado son unos puntos que caen dentro de una curva cuya forma matemática nos dice algo sobre el ritmo de difusión entre las islas. Las palabras viajaron en canoas, saltando de isla a isla en intervalos proporcionales al grado de situación de las islas afectadas. Dentro de una isla, las palabras cambian a un ritmo constante, de la misma manera que se producen mutaciones ocasionales en los genes. Cualquier isla, aunque estuviese aislada, exhibiría, con el tiempo, algún cambio evolutivo en su lenguaje, lo que haría que se produjesen algunas divergencias con los idiomas de otras islas. Las islas más cercanas tendrían un intercambio de palabras más elevado, a través de las canoas, que las islas más lejanas. Sus idiomas habrían tenido también un antepasado común más reciente que el de las islas más alejadas. Estos fenómenos, que explican los patrones de similitud observados entre islas cercanas y lejanas, son bastante análogos a los hechos sobre los pinzones en las diferentes islas del archipiélago de las Galápagos que inspiraron originalmente a Charles Darwin. Los genes saltaron entre las islas en los cuerpos de los pájaros, de la misma forma que las palabras saltaron en las canoas.

Los idiomas, entonces, evolucionan. Pero aunque el inglés moderno ha evolucionado a partir del inglés de Chaucer, no creo que mucha gente estuviese dispuesta a proclamar que el inglés moderno representa una mejora sobre el inglés de Chaucer. Las ideas de mejora o calidad no entran, por lo común, en nuestras cabezas cuando hablamos del lenguaje. Por el contrario, en la medida en que lo hacen, vemos con frecuencia los cambios como un deterioro, una degeneración. Tenemos tendencia a ver los usos antiguos como correctos, y los cambios recientes como corrupciones. Pero podemos detectar tendencias similares a la evolución que son progresivas en un sentido puramente abstracto, sin valor. Y podemos, incluso, encontrar pruebas de la existencia de mecanismos de retroalimentación positiva, en forma de escalada (o, mirándolo desde otro punto de vista, degeneraciones) de los significados. Por ejemplo, la palabra «estrella» se utilizó para designar a un actor de cine de celebridad bastante excepcional. Luego degeneró, para pasar a significar cualquier actor ordinario que representase uno de los papeles principales en una película. Por ello, para volver a capturar el sentido original de celebridad excepcional, la palabra tuvo que escalar a «superestrella» *(superstar)*. Más tarde, los estudios de publicidad comenzaron a utilizar esta palabra para designar actores de los que mucha gente no había oído hablar nunca, de forma que tuvo

que producirse una nueva escalada hasta «megaestrella» *(megastar)*. En la actualidad, hay unas pocas «megaestrellas» anunciadas, de las que yo, al menos, nunca había oído hablar, de manera que quizá nos estemos preparando para otra escalada. ¿Oiremos hablar de «hiperestrellas» *(hyperstars)*? Un mecanismo de retroalimentación positiva similar ha reducido el valor de la palabra *chef*. Procede, por supuesto, del francés *chef de cuisine*, que quiere significar el jefe o director de una cocina. Este es el significado que tiene en el *Oxford Dictionary*. Entonces, por definición, sólo puede haber un *chef* por cocina. Pero, tal vez para satisfacer su dignidad, los cocineros ordinarios, incluso los mozos jóvenes que hacen hamburguesas, comenzaron a llamarse a sí mismos *chefs*. El resultado es que con frecuencia se oye la frase tautológica de *¡chef director!*

Pero si ésta es una analogía de la selección sexual, lo es, como mucho, sólo en lo que he llamado el sentido «ligero». Permítaseme saltar al enfoque siguiente, que imagino como una analogía marcada: el mundo de los discos de música *pop*. Si se escucha una discusión entre aficionados a los discos de música *pop*, o se conecta en la radio las voces de los *disc-jockeys* de la otra mitad del Atlántico, se descubrirá algo muy curioso. Mientras otros géneros de crítica artística revelan alguna preocupación por el estilo o la habilidad en la realización, el humor, el impacto emocional, las cualidades y propiedades de la forma de arte, la subcultura de la música *pop* está interesada casi exclusivamente en *la popularidad por sí misma*. Está bastante claro que lo importante de un disco no es cómo suena, sino *cuánta gente lo compra*. La subcultura está obsesionada con una jerarquía de orden de los discos, denominada los 20 principales o los 40 principales, basada únicamente en las cifras de ventas. Lo que de verdad importa de un disco es dónde está situado en la lista de los 40 principales. Cuando se piensa en ello, es un hecho bastante singular, e interesante si pensamos en la teoría de R. A. Fisher sobre la evolución incontrolada. Probablemente, es también significativo que un *disc-jockey* mencione la posición actual de un disco en las listas, sin decirnos, al mismo tiempo, su posición durante la semana anterior. Esto le permite a la audiencia evaluar no sólo la popularidad actual del disco, sino también su ritmo y dirección de *cambio* en popularidad.

Parece que mucha gente compra un disco sólo porque un elevado número de personas lo están haciendo, o es probable que lo hagan. Una prueba sorprendente procede del conocido hecho de que hay compañías de grabación que envían representantes a los principales establecimientos para comprar grandes cantidades de sus propios discos, y empujar así las cifras de

ventas hasta hacerlos «despegar». (Esto no es tan difícil de hacer como suena, porque las cifras de los 20 principales están basadas en las ventas de una pequeña muestra de tiendas de discos. Si se sabe qué tiendas son, no hay que comprar tantos discos para producir un impacto significativo en el cálculo de ventas a través de todo el país. También hay historias bien documentadas de sobornos a dependientes en estos establecimientos claves.)

El mismo fenómeno, en menor extensión, de la popularidad de ser popular por propia consideración es bien conocido en los ambientes editoriales, en los de modas femeninas, y en los de publicidad, en general. Una de las mejores cosas que un anunciante puede decir sobre su producto es que es el que más se vende. Las listas de los libros más vendidos se publican semanalmente, y es indudable que en tanto un libro venda suficientes ejemplares para aparecer en una de esas listas, sus ventas aumentarán aún más, sólo por eso. Los editores hablan de un libro «despegando», y quienes tienen algunos conocimientos científicos hablan incluso de una «masa crítica para despegar». La analogía aquí es con una bomba atómica. El uranio-235 es estable en tanto no se concentre una cantidad demasiado grande del mismo en un sitio. Existe una masa crítica que, una vez sobrepasada, permite que se produzca una reacción en cadena, o un proceso incontrolado, con resultados devastadores. Una bomba atómica contiene dos porciones de uranio-235, más pequeñas que la masa crítica. Cuando se detona la bomba, los dos montones se juntan, sobrepasan la masa crítica, y es el final de una ciudad de tamaño medio. Cuando las ventas de un libro «se acercan al punto crítico», las cifras alcanzan el punto en el que las recomendaciones de boca en boca, etc., hacen que sus ventas despeguen súbitamente de manera incontrolada. El ritmo de ventas se torna, de repente, más elevado de lo que era antes de alcanzar la masa crítica, y puede haber un período de crecimiento exponencial, antes de alcanzar la inevitable estabilización y el declive posterior.

El fenómeno subyacente no es difícil de entender. Tenemos aquí más ejemplos de mecanismos de retroalimentación positiva. Las cualidades reales de un libro, o incluso de un disco de música *pop*, no pueden ignorarse en la determinación de sus ventas; sin embargo, siempre que haya mecanismos de retroalimentación positiva al acecho, existirá un elemento marcadamente arbitrario, que determinará qué libro o qué disco tendrá éxito, y cuál fracasará. Si la masa crítica y el despegue son elementos importantes en cualquier historia de éxito, existirá una gran intervención del azar, y habrá un gran campo para la manipulación y la explotación por parte de la gente que comprende el

sistema. Merece la pena, por ejemplo, emplear una suma considerable de dinero para promocionar un libro o un disco, hasta el punto en el que «alcanza el punto crítico», porque, a partir de aquí, no será necesario gastar tanto dinero en su promoción: el mecanismo de retroalimentación positiva tomará el relevo y realizará el trabajo publicitario por el editor.

Los mecanismos de retroalimentación positiva tienen aquí algo en común con los de la selección sexual, de acuerdo con la teoría de Fisher/Lande, pero también existen diferencias. Los faisanes hembras que prefieren faisanes de cola larga son favorecidos sólo porque hay *otras* hembras que tienen la misma preferencia. Las cualidades masculinas, por sí solas, son arbitrarias e irrelevantes. A este respecto, un entusiasta que quiera un disco determinado sólo porque está entre los 20 principales se está comportando como un faisán hembra. Pero el mecanismo exacto por el que funciona la retroalimentación positiva es diferente en los dos casos. Y esto, supongo, nos devuelve al comienzo del capítulo, con el aviso de que las analogías deben tomarse hasta aquí, y no más allá.

9. DESBARATAR LAS INTERRUPCIONES

Los hijos de Israel, de acuerdo con la descripción del Éxodo, tardaron cuarenta años en atravesar el desierto del Sinaí hasta llegar a la tierra prometida. Una distancia de unos trescientos veinte kilómetros. Su velocidad media se puede calcular, por tanto, en unos veinte metros por día, o metro por hora; digamos, unos tres metros por hora, si contamos las paradas para pernoctar. Sin embargo, si estudiamos estos cálculos, veremos que estamos tratando con una velocidad media absurdamente lenta, mucho más lenta que la marcha del caracol (la increíble velocidad de 50 metros por hora es el récord mundial de los caracoles, de acuerdo con el *Guinness Book of Records*). Por supuesto, nadie cree realmente que se mantuviese esta velocidad media de una manera continua y uniforme. Los israelitas viajaron a tontas y a locas, acampando quizá largos períodos de tiempo en un sitio antes de continuar. Es probable que muchos de ellos no tuvieran una idea muy clara de que estaban *viajando* en una dirección constante, y vagaran en círculos de oasis a oasis, como suelen hacer los pastores nómadas del desierto. Nadie, repito, cree realmente que se mantuviese una velocidad media de manera continua y uniforme.

Pero supongamos que dos elocuentes historiadores jóvenes irrumpen en la escena. Hasta ahora, nos dicen, la historia bíblica ha estado dominada por la escuela de pensamiento «gradualista». Los historiadores «gradualistas», nos cuentan, creen de verdad que los israelitas viajaron a una velocidad de veinte metros por día; recogían sus tiendas por la mañana, caminaban a paso de tortuga una distancia de veinte metros en dirección estenordeste, y luego montaban de nuevo el campamento. La única alternativa al «gradualismo», nos dicen, es la nueva y dinámica escuela de historia «interrupcionista». De acuerdo con los jóvenes interrupcionistas radicales, los israelitas permanecieron la mayor parte de su tiempo «estáticos», sin moverse, acampados, a menudo, años en un sitio. Luego se moverían, con bastante rapidez, a un nuevo campamento, donde permanecerían de nuevo varios años. Su progreso hacia la tierra prometida, en lugar de ser gradual y continuo, fue desigual: largos períodos estáticos interrumpidos por breves períodos de movimientos rápidos. Por otra parte, sus movimientos no eran siempre en dirección hacia la tierra prometida, sino en cualquier dirección escogida al azar. Sólo cuando miramos retrospectivamente el patrón de la *macromigración* a gran escala, podemos ver una tendencia en dirección hacia la tierra prometida.

Tal es la elocuencia de los historiadores bíblicos interrupcionistas, que causó sensación en los medios de difusión. Sus retratos adornan las portadas de las revistas de gran tirada. Ningún documental de televisión sobre historia bíblica está completo sin una entrevista al menos a uno de los interrupcionistas más destacados. La gente que no sabe nada más de erudición bíblica recuerda sólo un hecho: que en los días tenebrosos antes de que los interrupcionistas irrumpieran en escena, todos los demás estaban equivocados. Nótese que el valor publicitario de los interrupcionistas no tiene nada que ver con el supuesto de que las autoridades anteriores fueran «gradualistas» y estuvieran equivocadas. Los interrupcionistas se presentan como revolucionarios; por eso se les escucha, no porque tengan razón.

Mi relato sobre los historiadores bíblicos interrupcionistas no es, por supuesto, cierto. Es una parábola sobre una supuesta controversia análoga entre estudiosos de la evolución biológica. En algunos aspectos, es una parábola injusta, pero no tanto; es lo suficientemente cierta como para justificar el contarla al principio de este capítulo. Existe una escuela de pensamiento muy anunciada entre los biólogos evolucionistas, cuyos proponentes se hacen llamar interrupcionistas, y que inventaron el término «gradualista» para sus predecesores más influyentes. Han disfrutado de una enorme publicidad, entre un público que no sabe casi nada sobre evolución. Y se debe, en gran medida, a que su posición ha sido presentada por periodistas segundones, más que por ellos mismos, como radicalmente distinta de las posiciones de los evolucionistas anteriores, especialmente Charles Darwin. Hasta aquí, mi analogía bíblica es justa.

Hay un aspecto en el que esta analogía no es justa: en la narración de los historiadores bíblicos, «los gradualistas» eran obviamente hombres de paja inexistentes, fabricados por los interrupcionistas. En el caso de los evolucionistas «gradualistas», no es tan *obvio* el hecho de que sean hombres de paja inexis-

tentes. Es necesario demostrarlo. Es posible interpretar las palabras de Darwin y las de otros muchos evolucionistas como gradualistas, en cierto sentido, pero entonces adquiere importancia comprender que la palabra gradualista puede interpretarse de distintas maneras, para significar cosas diferentes. Por supuesto, puedo desarrollar una interpretación de la palabra «gradualista», de acuerdo con la cual casi todo el mundo resultaría serlo. En el caso evolucionista, a diferencia de la parábola de los israelitas, hay una genuina controversia oculta, pero sobre pequeños detalles que, de ninguna manera, son lo bastante importantes como para justificar la hiperactividad de los medios de comunicación.

Entre los evolucionistas, los «interrupcionistas» fueron reclutados, al principio, entre las filas de la paleontología. La paleontología es el estudio de los fósiles. Es una rama muy importante de la biología, porque los antepasados evolucionarios murieron todos hace mucho tiempo y los fósiles nos facilitan la única evidencia directa de los animales y plantas del pasado lejano. Si queremos saber a qué se parecían nuestros antepasados evolucionarios, los fósiles son nuestra principal esperanza. Tan pronto como la gente se dio cuenta de lo que en realidad eran los fósiles —las escuelas de pensamiento antiguas habían mantenido que eran creaciones del demonio, o huesos de pobres pecadores ahogados en el diluvio— se aclaró que cualquier teoría sobre la evolución debería tener ciertas expectativas sobre la historia de los fósiles. Pero ha habido algunas discusiones sobre cuáles serían exactamente dichas expectativas, y de esto es, en parte, de lo que trata el argumento interrupcionista.

Después de todo, tenemos suerte de que haya fósiles. Es una suerte para la geología, que los huesos, conchas y otras partes duras de los animales dejen una huella, antes de descomponerse, que actuará mas tarde como un molde, que modelará la dura roca formando un registro permanente del animal. No sabemos qué proporción de animales se fosilizan después de su muerte —personalmente, consideraría un honor ser fosilizado— pero, por supuesto, es muy pequeña. Sin embargo, no importa lo pequeña que sea, hay ciertas cosas sobre la historia de los fósiles que cualquier evolucionista desearía que fuesen ciertas. Debería sorprendernos, por ejemplo, encontrar fósiles humanos anteriores a cuando se supone que evolucionaron los mamíferos. Si se descubriese un solo cráneo de mamífero, completamente verificado, entre rocas de hace 500 millones de años, todas nuestras teorías modernas sobre la evolución quedarían destruidas. Incidentalmente, ésta es una respuesta a las patrañas que han hecho correr los creacionistas, y los periodistas que les acompañan en

su viaje, de que toda la teoría de la evolución es una redundancia «a prueba de falsificaciones». Irónicamente, ésta es también la razón por la que los creacionistas estaban tan interesados en las huellas humanas falsas, talladas durante los años de la depresión para engañar a los turistas, en los lechos de los dinosaurios de Texas.

De cualquier manera, si clasificamos los fósiles genuinos con un orden, desde el más viejo al más joven, la teoría de la evolución deseará encontrar una secuencia ordenada, más que un revoltijo sin orden ni concierto. Además, y a propósito de este capítulo, diferentes versiones de la teoría de la evolución, por ejemplo «gradualismo» e «interrupcionismo», esperarían ver diferentes clases de patrones. Estas expectativas sólo pueden probarse si tenemos algún medio de *datar* los fósiles o, al menos, de conocer el orden en el que se depositaron. Los problemas que existen a la hora de datar los fósiles, y las soluciones adoptadas, requieren una breve divagación fuera del tema, la primera, entre otras varias; por lo que solicito la indulgencia del lector. Son necesarias para explicar el tema principal de este capítulo.

Sabemos, desde hace tiempo, cómo clasificar los fósiles en el mismo orden en que se depositaron. Este método es inherente a la propia palabra «depositar». Los fósiles recientes están depositados encima de los más antiguos, en lugar de estar debajo y, por tanto, descansan encima de ellos en los sedimentos rocosos. Ocasionalmente, los cataclismos volcánicos pueden dar la vuelta a un trozo de roca y colocarlo encima y, entonces, el orden en el que encontraremos los fósiles será el inverso; pero esto es tan raro como para que resulte obvio cuando sucede. Aun cuando raramente encontraremos un registro histórico completo al excavar las rocas de cualquier área, se puede reunir un buen registro juntando las piezas de distintas porciones superpuestas en áreas diferentes (en realidad, aunque utilice la imagen «excavar», los paleontólogos raramente excavan las capas estratificadas; es más probable que encuentren los fósiles expuestos por la erosión a diferentes profundidades). Mucho antes de que supieran cómo datar fósiles en millones de años actuales, los paleontólogos habían encontrado un esquema fiable de las eras geológicas, y se conocía con gran detalle qué era iba antes que otra. Ciertas clases de conchas son unos indicadores tan fiables de la antigüedad de las rocas que constituyen uno de los principales indicadores utilizados por los buscadores de petróleo. Sin embargo, sólo pueden decimos la antigüedad relativa de las capas de rocas estratificadas, nunca su antigüedad absoluta.

Más recientemente, los avances en física nos han suministrado métodos para poner fechas exactas, en millones de años,

en las rocas y los fósiles que contienen. Estos métodos dependen del hecho de que determinados elementos radiactivos se descomponen con un ritmo conocido muy preciso. Es como si se hubiesen enterrado cronómetros de precisión miniaturizados en las rocas. Cada cronómetro se puso en marcha en el momento en que fue depositado. Todo lo que tienen que hacer los paleontólogos es desenterrarlos y leer el tiempo en el dial. Diferentes clases de cronómetros geológicos basados en la desintegración radiactiva corren con diferentes ritmos. El cronómetro de carbono radiactivo funciona con un ritmo elevado, tan rápido que, después de algunos miles de años, su cuerda está casi desenroscada, y ya no resulta fiable. Es útil para fechar materiales orgánicos en la escala de tiempo arqueológica/histórica, en la cual tratamos con cientos o unos pocos miles de años, pero no es bueno para la escala de tiempo evolutiva, en la que tratamos con millones de años.

Para una escala de tiempo evolutiva hay otras clase de relojes, como el reloj de potasio-argón. Este reloj es tan lento que resultaría inadecuado para la escala de tiempo arqueológica/histórica. Sería como tratar de utilizar la aguja de marcar las horas de un reloj ordinario para medir el tiempo que tarda un atleta en correr cien metros. Por otra parte, lo que necesitamos para medir el tiempo del megamaratón que es la evolución, es algo así como un reloj de potasio-argón. Otros «cronómetros» radiactivos, cada uno con su ritmo lento característico, son los de rubidio-estroncio y el de uranio-torio-plomo. Así pues, esta divagación nos dice que si se le presenta un fósil a un paleontólogo, puede saber cuando vivió el animal, en una escala de tiempo absoluta de millones de años. Hay que recordar que iniciamos este tema sobre el establecimiento de fechas y tiempos, porque estábamos interesados en las expectativas sobre la historia de los fósiles que debían tener distintos tipos de teorías evolutivas: «interrupcionistas», «gradualistas», etc. Es tiempo ahora de discutir cuáles son estas distintas expectativas.

Supongamos, primero, que la naturaleza hubiese sido muy buena con los paleontólogos (o quizá mala, cuando se piensa en el trabajo extra que implica), y les suministrase un fósil de cada animal que haya vivido en cualquier tiempo. Si pudiésemos contemplar un registro de fósiles tan completo, cuidadosamente clasificado en orden cronológico, ¿qué esperaríamos ver, como evolucionistas? Bien, si fuésemos «gradualistas», en el sentido caricaturizado en la parábola de los israelitas, esperaríamos ver algo así. Las secuencias cronológicas de los fósiles exhibirían tendencias evolutivas uniformes, con un ritmo fijo de cambio. En otras palabras, si tenemos tres fósiles *A*, *B* y *C*, siendo

A anterior a *B*, y éste, a su vez, anterior a *C*, esperaríamos que *B* tuviese una forma proporcionalmente intermedia entre *A* y *C*. Por ejemplo, si *A* tuviese patas de 50 centímetros de longitud y *C* de 100 centímetros, las patas de *B* deberían ser intermedias, con una longitud proporcional al tiempo transcurrido entre la existencia de *A* y de *B*.

Si llevamos la caricatura del gradualismo a su conclusión lógica, del mismo modo como calculamos la velocidad media de los israelitas en 20 metros por día, así también podríamos calcular el ritmo medio de alargamiento de las patas en la línea evolutiva de descendientes entre *A* y *C*. Si, digamos, *A* vivió 20 millones de años antes que *C* (para hacer que esto encaje vagamente en la realidad, el miembro más primitivo conocido de la familia de los caballos, el *Hyracotherium*, vivió hace unos 50 millones de años, y tenía el tamaño de un perro Terrier), tenemos un ritmo de crecimiento evolutivo de 50 centímetros cada 20 millones de años, o una millonésima de centímetro por año. Ahora, la caricatura del gradualista se supone que cree que las patas crecen de una manera continua, a lo largo de generaciones, con este ritmo tan lento: digamos 4 millonésimas de centímetro por generación, si asumimos un tiempo de generación como el del caballo, de alrededor de 4 años. El gradualista se supone que cree que, a través de todos estos millones de generaciones, los individuos con patas cuatro millonésimas de centímetro más largas que la media tenían una ventaja sobre los individuos con una longitud media. Creer esto es como creer que los israelitas recorrieron 20 metros cada día a través del desierto.

Lo mismo es cierto, incluso, de uno de los cambios evolutivos más rápidos conocidos, el aumento de tamaño del cráneo humano desde un antepasado como el *Australopithecus*, con un volumen craneal de unos 500 centímetros cúbicos (cm^3), hasta el volumen cerebral medio del *Homo sapiens* moderno, de cerca de 1 400 cm^3. Este incremento de unos 900 cm^3, casi tres veces el volumen cerebral, se ha conseguido en menos de tres millones de años. Para estándares evolutivos, éste es un ritmo rápido de cambio: parece que el cerebro se hincha como un balón; visto desde algunos ángulos, el cráneo humano moderno se parece bastante a un balón esférico, con forma de bulbo, en comparación con los cráneos planos, y las caras inclinadas de los *Australopithecus*. Pero si contamos el número de generaciones en tres millones de años (pongamos, unas cuatro por siglo), el ritmo medio de evolución es de menos de una centésima de centímetro cúbico por generación. La caricatura del gradualista se supone que cree que hubo un cambio lento e inexorable, generación por generación, de forma que en todas las generaciones los

hijos tenían un poco más de cerebro que sus padres, 0,01 cm^3. Se supone que esta centésima de centímetro cúbico extra suministraría a cada generación triunfante una ventaja significativa para la supervivencia, en comparación con la generación previa.

Pero una centésima de centímetro cúbico es una cantidad diminuta, en comparación con el intervalo de tamaños de cerebros que encontramos entre los seres humanos modernos. Por ejemplo, con frecuencia se cita que el escritor Anatole France –que no fue tonto, y ganó un premio Nobel– tenía un cerebro de un tamaño de menos de 1 000 cm^3, mientras que en el otro extremo, no son raros los cerebros de 2 000 cm^3: se cita a Oliver Cromwell como ejemplo, aunque no sé con qué autenticidad. Luego, el incremento medio de 0,01 cm^3 por generación, que según la caricatura de un gradualista se supone que suministra una ventaja significativa para la supervivencia, es una mera cienmilésima parte de la *diferencia* entre los cerebros de Anatole France y Oliver Cromwell. Realmente es una suerte que no exista la caricatura del gradualista.

Si esta clase de gradualista es una caricatura inexistente –un molino de viento para los lances interrupcionistas–, ¿hay alguna otra clase de gradualista que exista realmente y que mantenga creencias sostenibles? Debo demostrar que la respuesta es un sí, y que las filas de los gradualistas, en este segundo sentido, incluyen a todos los evolucionistas sensibles, entre ellos, cuando se examinan con detalle sus creencias, aquellos que se llaman a sí mismos interrupcionistas. Pero tenemos que comprender por qué los interrupcionistas pensaron que sus puntos de vista eran revolucionarios y estimulantes. El punto de partida para discutir este tema es la existencia aparente de «intervalos» *(gaps)* en el registro de fósiles, y es hacia esos «intervalos» hacia donde nos dirigimos ahora.

Después de Darwin, los evolucionistas se han dado cuenta de que, si clasificamos todos los fósiles de que disponemos en orden cronológico, no forman una secuencia uniforme con cambios escasamente perceptibles. Podemos distinguir, con seguridad, tendencias de cambio a largo plazo: las piernas se hacen progresivamente más largas, los cráneos adquieren forma de bulbo, etc., pero estas tendencias vistas en la historia de los fósiles son normalmente desiguales, no uniformes. Darwin y muchos de sus seguidores asumieron que esto se debe a que el registro de fósiles es imperfecto. Su punto de vista era que un registro de fósiles completo, si tuviésemos alguno, mostraría alteraciones ligeras en lugar de cambios desiguales. Pero dado que la fosilización es un problema de suerte, y encontrar estos fósiles precisa casi la misma suerte, es como si tuviésemos una película de cine con la mayoría de los fotogramas perdidos. Podemos ver, con seguridad, un cierto movimiento cuando proyectamos nuestra película de fósiles, pero salta más que las de Charles Chaplin, ya que incluso sus películas más viejas y rayadas no han perdido nueve décimas partes de sus recuadros.

Los paleontólogos americanos Niles Eldredge y Stephen Jay Gould, cuando propusieron su teoría de los equilibrios interrumpidos, en 1972, hicieron algo que se ha presentado desde entonces como una sugerencia muy diferente. Sugirieron que, en realidad, el registro de fósiles puede que no sea tan imperfecto como pensamos. Puede que los «intervalos» *(gaps)* reflejen lo que sucedió en realidad, en lugar de ser las consecuencias fastidiosas, pero inevitables, de un registro de fósiles imperfecto. Puede ser, sugirieron, que la evolución avanzase en cierto sentido mediante explosiones súbitas, interrumpiendo largos períodos de «éxtasis», durante los cuales no habría tenido lugar ningún cambio evolutivo en una descendencia determinada.

Antes de que lleguemos a la clase de explosiones súbitas que tenían en mente, hay algunos significados concebibles de «explosiones súbitas» que ellos seguro que no tenían en mente. Deben eliminarse del camino porque han sido objeto de serios malentendidos. Eldredge y Gould estarían de acuerdo, por cierto, con que algunos intervalos muy importantes se deben a imperfecciones en el registro de fósiles. Los intervalos muy grandes, también. Por ejemplo, los estratos de rocas del período Cámbrico, de alrededor de 600 millones de años, son los más antiguos en los que encontramos una mayoría de grupos invertebrados. Y encontramos ya a muchos de ellos en un avanzado estado de evolución, la primera vez que aparecen. Es como si hubiesen sido plantados allí, sin una historia evolutiva. No hace falta decir que esta apariencia de siembra súbita ha hecho las delicias de los creacionistas. Los evolucionistas de todo tipo creen, sin embargo, que ello representa, en realidad, un intervalo muy grande en la historia de los fósiles, intervalo que se debe al hecho de que, por alguna razón, muy pocos fósiles procedentes de períodos anteriores a esa fecha han durado hasta ahora. Una buena razón podría ser que muchos de estos animales tendrían sólo partes blandas en sus cuerpos: ninguna concha o huesos que fosilizar. Si hay algún creacionista, podría pensar que hago un alegato especial. Mi punto de vista aquí es que, cuando estamos hablando de intervalos de esta magnitud, no hay ninguna diferencia en las interpretaciones de «interrupcionistas» y «gradualistas». Ambas escuelas de pensamiento desprecian igualmente a los llamados creacionistas científicos, y ambas están de acuerdo en que los intervalos *más grandes* son reales, y que se trata

de verdaderas imperfecciones en el registro de fósiles. Ambas escuelas están de acuerdo en que la única explicación alternativa a la aparición súbita de tantos tipos de animales complejos en la era cámbrica es la creación divina, y ambas la rechazan.

Existe otro sentido concebible en el que podría decirse que la evolución avanza a tirones producidos de manera súbita, pero que tampoco es el sentido propuesto por Eldredge y Gould; por lo menos, en la mayoría de sus escritos. Puede concebirse que no hubiera intermediarios; que se produjeran grandes cambios evolutivos en una sola generación. Podría nacer un hijo tan diferente de su padre que perteneciera, en realidad, a una especie distinta. Sería un individuo mutante, y la mutación sería tan extensa que nos referiríamos a ella como una macromutación. Las teorías evolutivas que se basan en macromutaciones se llaman teorías «saltatorias», derivado de *saltus*, palabra latina que significa «salto». Dado que la teoría del equilibrio interrumpido se suele confundir con la teoría de los verdaderos saltos, es importante tratarla aquí, y demostrar por qué no puede ser un factor significativo en la evolución.

Sin duda, se producen macromutaciones: mutaciones que producen grandes efectos. Lo que se discute no es si se producen, sino si juegan algún papel en la evolución; en otras palabras, si se incorporan al conjunto de genes de una especie, o si, por el contrario, son eliminadas por la selección natural. Un famoso ejemplo de macromutación son las «antenapedias» de la mosca de la fruta. En un insecto normal, las antenas tienen algo en común con las patas, y se desarrollan de manera similar en el embrión. Pero las diferencias son también llamativas, y las dos clases de miembros se utilizan con diferentes finalidades: las patas para caminar; las antenas para sentir, oler y percibir. Las moscas antenapédicas son monstruos en los que las antenas se desarrollan como las piernas. O, poniéndolo de otra forma, son moscas que, en lugar de tener antenas, tienen un par extra de patas, que crecen en el lugar donde deberían estar las antenas. Es una verdadera mutación, en el sentido de que es el resultado de un error durante la copia del DNA. Se multiplican si se mantienen en el laboratorio de forma que sobrevivan lo suficiente para procrear. No sobrevivirían en estado natural, ya que sus movimientos son torpes y sus sentidos vitales están deteriorados.

Así pues, las macromutaciones se producen. Pero ¿cumplen alguna función en la evolución? Los saltacionistas creen que las macromutaciones constituyen un medio por el que podrían tener lugar grandes saltos en la evolución en una sola generación. Richard Goldschmidt (véase el capítulo 3), es un verdadero saltacionista. Si esta teoría fuese cierta, los «intervalos» en la historia de los fósiles no necesitarían ser tales. Por ejemplo, un saltacionista creería que la transición del *Australopithecus* de frente inclinada, al *Homo sapiens*, de frente abovedada, tuvo lugar en un solo paso macromutacional, en una sola generación. La diferencia de forma entre las dos especies es probablemente menor que la diferencia entre una mosca normal y una antenapédica, y en teoría podría concebirse que el primer *Homo sapiens* fuese un niño monstruo —probablemente desterrado y perseguido—, fruto de dos padres *Australopithecus* normales.

Hay buenas razones para rechazar todas estas teorías saltacionistas sobre la evolución. Una, bastante aburrida, es que si se originase una nueva especie en un solo paso mutacional, los miembros de esta nueva especie podrían tener grandes dificultades para encontrar pareja. Pero yo creo que es menos reveladora e interesante que las otras dos que anuncié en nuestra discusión, de por qué hay que descartar los grandes saltos a través de la Tierra de las Bioformas. El primero de estos puntos lo señaló el gran biólogo y estadístico R. A. Fisher, a quien encontramos en capítulos previos. Fisher era un firme oponente de todas las formas de saltacionismo, en unos momentos en los que estas teorías estaban mucho más de moda que hoy, y utilizó la siguiente analogía. Imaginemos, dijo, un microscopio que esté enfocado, aunque no del todo, y por lo demás ajustado para obtener una clara visión. ¿Qué probabilidades tendríamos de mejorar el enfoque y la calidad general de la imagen, si hacemos un cambio al azar en el microscopio (equivalente a una mutación)? Fisher decía:

> Resulta obvio que cualquier alteración grande tendrá una probabilidad muy pequeña de mejorar el ajuste, mientras que en el caso de alteraciones mucho menores que la más pequeña de aquellas realizadas intencionalmente por el fabricante o el operador, la probabilidad de mejora sería de casi la mitad.

Ya advertí que lo que Fisher supuso «fácil de ver» y pensó que resultaba «obvio» podría suponer exigencias notables en los poderes mentales de los científicos ordinarios. Reflexiones posteriores demostraron que casi siempre había estado en lo cierto y, en este caso, podemos probarlo, para nuestra entera satisfacción, sin demasiada dificultad. Hay que recordar que antes de empezar estamos asumiendo que el microscopio tiene un enfoque casi correcto. Supongamos que la lente esté ligeramente por debajo de lo que debiera para tener un enfoque perfecto unos dos milímetros hacia el porta. Ahora, si lo movemos un poco,

una décima de milímetro en una dirección al azar, ¿qué probabilidades tenemos de mejorar el enfoque? Si lo movemos hacia abajo una décima de milímetro, el enfoque empeorará. Si hacia arriba, mejorará. Como lo movemos en una dirección al azar, la probabilidad de cada uno de estos dos sucesos es de un medio. Cuanto menor sea el movimiento de ajuste, con relación al error inicial, más se aproximará la probabilidad de mejora a un medio. Esto completa la justificación de la segunda parte de la afirmación de Fisher.

Ahora, supongamos que movemos el tubo óptico del microscopio una gran distancia —equivalente a una macromutación— en una dirección también al azar; digamos, unos dos centímetros. No importa en qué dirección efectuemos el movimiento, hacia arriba o hacia abajo, haremos que el enfoque sea peor que antes. Si lo movemos hacia abajo, quedará a más de dos centímetros de su posición ideal (y, probablemente habrá aplastado el porta). Si lo movemos hacia arriba, quedará a menos de dos centímetros de su posición ideal, de forma que, en ambos casos, nuestro movimiento «macromutacional» ha sido un fracaso. Hemos hecho los cálculos para un movimiento grande («macromutación») y un movimiento muy pequeño («micromutación»). Podemos realizar los mismos cálculos para un intervalo de movimientos de tamaño intermedio, pero no hay motivo para hacerlo. Pienso que ahora resultará obvio que cuanto más pequeño sea el movimiento que hagamos, más cerca estaremos del caso extremo en el que la probabilidad de conseguir una mejora es de un medio; y cuanto más grande, más cerca del caso extremo en el que la probabilidad de conseguir una mejora sea cero.

El lector habrá observado que este argumento depende del supuesto inicial en el que el microscopio estaba muy cerca de su punto de enfoque, incluso antes de empezar a hacer ajustes al azar. Si el microscopio estuviese al comienzo 5 centímetros fuera de foco, entonces un cambio al azar de 2,5 centímetros tendría un 50 por ciento de probabilidades de constituir una mejora, como la tendría un cambio al azar de unas dos décimas de milímetro. En este caso, la «macromutación» tendría la ventaja de que enfocaría el microscopio con mayor rapidez. El argumento de Fisher también se aplica, por supuesto, a «megamutaciones» de, digamos, movimientos de quince centímetros en cualquier dirección al azar.

¿Por qué, entonces, se permitió Fisher realizar su supuesto inicial de que el microscopio estaba casi enfocado al comenzar? El supuesto se deriva del papel que juega el microscopio en la analogía. Después de su ajuste al azar, representa a un animal

mutante. Antes de este ajuste, simboliza al padre normal, sin mutar, del supuesto mutante. Como es un padre, debe de haber sobrevivido el tiempo suficiente para reproducirse y, por tanto, no puede estar muy lejos de un buen ajuste. Por esta razón, el microscopio no puede estar demasiado lejos del enfoque antes de dar el salto, o el animal que representa en la analogía no podría haber sobrevivido. Es sólo una analogía, y no merece la pena discutir si el «demasiado lejos» significa un centímetro, una décima de centímetro o una milésima de centímetro. Lo esencial es que si consideramos mutaciones de una magnitud que aumenta progresivamente, llegaremos a un punto en el que, cuanto más grande sea la mutación, tendrá menos probabilidades de ser beneficiosa; mientras que si consideramos mutaciones de una magnitud que disminuye de forma progresiva, llegaremos a un punto en el que la probabilidad de que las mutaciones sean beneficiosas será de un 50 por ciento.

El argumento sobre si las mutaciones como las de la antenapedia pueden, en alguna ocasión, ser beneficiosas (o, por lo menos, si se puede evitar que sean dañinas), y, por tanto, si pueden dar lugar a cambios evolutivos, se centra a su vez en la dimensión del «macro» de la mutación que estamos considerando. Cuanto más «macro» sea, más probabilidades tiene de ser nociva, y menos de ser incorporada en la evolución de una especie. De hecho, todas las mutaciones estudiadas en los laboratorios de genética —que son bastante macro porque, de otra manera, los genetistas no las habrían notado— son nocivas para los animales que las poseen (irónicamente, me he encontrado gente que piensa que este es un argumento *¡contra* el darwinismo!). El argumento del microscopio de Fisher suministra una razón para el escepticismo sobre las teorías «saltatorias» de la evolución; por lo menos, en sus formas extremas.

La otra razón general para no creer en los verdaderos saltos es también estadística, y su fuerza depende, cuantitativamente, de la dimensión del macro que tiene la macromutación que estamos postulando. En este caso, está relacionada con la complejidad de los cambios evolutivos. Muchos de los cambios evolutivos por los que nos interesamos son avances en complejidad de diseño. El ejemplo extremo del ojo, que expuse en capítulos anteriores, reafirma esta idea. Los animales con ojos como los nuestros evolucionaron a partir de antepasados que no tenían ojos. Un saltacionista extremo podría postular que la evolución tuvo lugar mediante una sola mutación. Un padre no tenía ojos, sólo la piel desnuda en el lugar donde debieran estar. Este padre habría tenido un descendiente monstruoso con ojos totalmente desarrollados, con un cristalino para realizar un enfoque varia-

ble, un diafragma de iris para «reducir» la cantidad de luz, una retina con millones de fotocélulas de tres colores, y las terminaciones nerviosas conectadas correctamente con el cerebro para suministrarle una perfecta visión estereoscópica binocular en color.

En el modelo de las bioformas asumimos que no podía ocurrir esta clase de mejora multidimensional. Recapitulemos, y veamos por qué era una hipótesis razonable que para hacer un ojo de la nada se necesita no una simple mejora sino un gran número de mejoras. Cualquiera de ellas es bastante improbable, pero no tanto como para ser imposible. Cuanto mayor sea el número de mejoras simultáneas que consideremos, más improbable será su ocurrencia simultánea. La coincidencia de que se produzca equivale a saltar una gran distancia a través de la Tierra de las Bioformas, y que se produzca el aterrizaje en un lugar determinado, designado con anterioridad. Si elegimos considerar un número suficientemente grande de mejoras, su ocurrencia conjunta se torna tan improbable como para resultar, para todos los intentos y propósitos, imposible. Ya hemos discutido el argumento, pero puede ser útil trazar una distinción entre las dos clases de macromutaciones hipotéticas, ya que ambas *parecen* quedar descartadas por el argumento de la complejidad pero, de hecho, sólo una *lo está*. Las etiquetaré, por razones que aclararé luego como macromutaciones tipo Boeing 747 y macromutaciones tipo Stretched DC8.

Las macromutaciones tipo Boeing 747 son las únicas descartadas por el argumento de la complejidad, que acabamos de dar. Su nombre procede del memorable malentendido del astrónomo sir Fred Hoyle, sobre la teoría de la selección natural. Él comparó la selección natural, en su pretendida imposibilidad, con un huracán soplando a través de un depósito de chatarra y la casualidad de que se produjese el montaje de un Boeing 747. Como vimos en el capítulo 1, se trata de una analogía enteramente falsa, aplicada a la selección natural, pero buena para la idea de algunas clases de macromutaciones que dan lugar a un cambio evolutivo. El error fundamental de Hoyle consiste en que él pensó, en efecto (sin darse cuenta), que la teoría de la selección natural *dependía* de una macromutación. La idea de que una sola mutación diese lugar a un ojo totalmente funcional, con las propiedades antes descritas, donde sólo había una piel desnuda, es, por supuesto, tan improbable como el que un huracán arme un Boeing 747. Es por eso que me refiero a esta clase de macromutaciones hipotéticas como macromutaciones tipo Boeing 747.

Las macromutaciones tipo Stretched DC8 son mutaciones

que, aunque puedan ser muy grandes en cuanto a la magnitud de sus efectos, no lo son en términos de su complejidad. El Stretched DC8 es un avión que se creó modificando uno anterior, el DC8. Es como un DC8, pero con un fuselaje más alargado. Constituyó una mejora, al menos desde el punto de vista de que podía llevar más pasajeros que el DC8 original. El alargamiento representa un gran aumento en longitud, y en este sentido es análogo a una macromutación. El aumento de longitud es, a primera vista, un tema complejo. Para alargar el fuselaje de un avión no basta con insertar un segmento adicional en la cabina. Hay que alargar también incontables conductos, conducciones de aire y cables eléctricos. Hay que poner muchos más asientos, ceniceros, luces para leer, selectores de música de 12 canales, y boquillas de entrada de aire fresco. A primera vista, parece que existe mucha más complejidad en un Stretched DC8 que en un DC8 ordinario, pero ¿la hay en realidad? La respuesta es no, por lo menos en cuanto a que las cosas «nuevas» en el avión alargado son sólo «más cosas de lo mismo». Las bioformas del capítulo 3 muestran macromutaciones de la variedad del Stretched DC8.

¿Qué tiene que ver con las mutaciones en animales reales? Algunas mutaciones reales producen grandes cambios, muy similares al cambio entre un DC8 y un Stretched DC8, y, algunas de ellas, aunque sean «macro» mutaciones en cierto sentido, han sido incorporadas definitivamente durante la evolución. Las serpientes, por ejemplo, tienen muchas más vértebras que sus antepasados. Podríamos asegurarlo, aunque no tuviésemos fósiles, porque las serpientes tienen muchas más vértebras que sus parientes supervivientes. Por otra parte, diferentes especies de serpientes tienen un número de vértebras distinto, lo que significa que el número vertebral debe de haber cambiado durante la evolución, ya que sus antepasados comunes, tenían todos el mismo número.

Ahora bien, para cambiar el número de vértebras en un animal es necesario hacer algo más que añadir un hueso. Cada vértebra tiene, asociado con ella, un conjunto de nervios, un conjunto de vasos sanguíneos, un conjunto de músculos, etc., de igual manera que una fila de asientos en un avión tiene un conjunto de almohadillas, un conjunto de posacabezas, un conjunto de enchufes para los auriculares, un conjunto de luces para leer con sus cables correspondientes, etc. La parte media del cuerpo de una serpiente, como la del cuerpo de un avión, está compuesta de un número de *segmentos*, muchos de los cuales son iguales entre sí, sin importar la complejidad que puedan tener todos por separado. Por lo tanto, para añadir nuevos seg-

mentos, todo lo que hay que hacer es un simple proceso de duplicación. Dado que existe una maquinaria genética para hacer un segmento de serpiente —maquinaria genética de gran complejidad, que costó construir muchas generaciones de evolución gradual, paso a paso— pueden añadirse nuevos segmentos con sólo un cambio mutacional. Si imaginamos los genes como «instrucciones destinadas a un embrión en desarrollo», un gen que controle la inserción de segmentos adicionales podría leerse simplemente como «más de lo mismo aquí». Me imagino que las instrucciones para construir el primer Stretched DC8 fueron, de alguna manera, similares.

Podemos estar seguros de que en la evolución de las serpientes, el número de vértebras cambió en números enteros, más que en fracciones. No podemos imaginar una serpiente con 26,3 vértebras. Tendría 26 o 27, y es obvio que debe de haber habido casos en los que un descendiente de las serpientes tuviese, al menos, una vértebra más que sus padres. Esto significa que tendría también un conjunto más de nervios, vasos sanguíneos, músculos, etc. Esta serpiente sería, entonces, una *macro*mutante, pero sólo en el sentido del «Stretched DC8». Es fácil creer que pudieran haberse originado serpientes con media docena de vértebras más que sus padres, mediante una sola mutación. El «argumento de la complejidad» contra la evolución saltatoria no se aplica a las macromutaciones tipo Stretched DC8, porque, si observamos con detalle la naturaleza del cambio implicado, no son verdaderas macromutaciones. Lo son sólo si consideramos, inocentemente, el producto final, el animal adulto. Si observamos el *proceso* de desarrollo embriónico resulta que son micromutaciones, en el sentido de que un pequeño cambio en las *instrucciones* del embrión tiene un gran efecto aparente en el adulto. Lo mismo es cierto para las antenapedias en las moscas de la fruta y otras muchas de las denominadas «mutaciones homeóticas».

Esto pone fin a mi divagación sobre las macromutaciones y la evolución saltatoria. Fue necesaria, porque, con frecuencia, se confunde con la teoría de los equilibrios interrumpidos. Pero *fue* una divagación porque el tema principal de este capítulo es la teoría de los equilibrios interrumpidos, y esta teoría, en realidad, no tiene conexiones con las macromutaciones y los verdaderos saltos.

Entonces, los intervalos *(gaps)* de los que hablan Eldredge, Gould y los demás «interrupcionistas», no tienen nada que ver con los verdaderos saltos; son intervalos mucho más pequeños que los que provocan a los creacionistas. Por otra parte, Eldredge y Gould introdujeron su teoría de una manera que no era

tan radical y revolucionariamente antagónica con respecto al darwinismo «convencional», ordinario —como se vendió más tarde—, sino como algo que *continuaba* por el camino del darwinismo convencional largamente aceptado y correctamente entendido. Para conseguir esta comprensión, me temo que necesitaremos otra divagación, esta vez sobre la cuestión del origen de las especies, proceso conocido como «especiación».

La respuesta de Darwin a esta cuestión fue, en sentido amplio, que las especies descendían de otras especies. Además, el árbol genealógico de la vida es un árbol ramificado, lo que significa que puede seguirse la pista de más de una especie moderna hasta una misma especie ancestral. Por ejemplo, los leones y los tigres son ahora miembros de diferentes especies, pero ambas arrancaron de una especie ancestral única, probablemente no hace mucho tiempo. Esta especie ancestral puede haber sido la misma que una de las dos especies actuales; o puede haber sido una tercera especie; o puede que se haya extinguido. De manera similar, los seres humanos y los chimpancés pertenecen ahora a especies claramente diferentes, pero sus antepasados de hace unos pocos millones de años pertenecían a una especie única. La especiación es el proceso por el que una especie única se transforma en dos, una de las cuales puede ser la misma que la original.

La razón por la que se piensa que la especiación es un problema difícil es ésta. Todos los miembros de una especie ancestral única son capaces, en potencia, de cruzarse entre sí: para mucha gente, esto es lo que *significa* el concepto «especie única». Por lo tanto, cada vez que una especie hija comienza a «ramificarse», esta ramificación está en peligro de frustrarse por los cruzamientos. Podemos imaginarnos a los antepasados potenciales de los leones y los tigres fracasar en su intento de separación, debido a que continuaban cruzándose entre sí y, por tanto, seguirían siendo similares entre sí. No hay que tomar al pie de la letra la utilización que hago de palabras como «frustrados», como si los antepasados de los leones y los tigres «quisieran» separarse entre sí. Es simplemente que, de hecho, las especies *han divergido* durante la evolución, y a primera vista el hecho de poder cruzarse entre sí dificulta que podamos ver cómo se produjo esta divergencia.

Parece casi cierto que la respuesta correcta a este problema es la única obvia. No existiría ningún problema de entrecruzamientos si los antepasados de los leones y los tigres estuviesen en diferentes partes del mundo, donde no pudiesen entrecruzarse. Por supuesto, no se fueron a distintos continentes para divergir: ¡no pensaban en sí mismos como los antepasados de

los leones o los tigres! Pero como de todas maneras la única especie ancestral se extendió por diferentes continentes, por ejemplo África y Asia, los que estaban en África no pudieron cruzarse ya con los que estaban en Asia porque nunca se volvieron a encontrar. Si existió alguna tendencia para que los animales evolucionasen en diferentes direcciones, bajo la influencia de la selección natural o bajo la influencia del azar, los entrecruzamientos dejaron de constituir una barrera para que se produjese su divergencia y llegasen a ser dos especies diferentes.

He hablado de continentes diferentes para dejarlo claro, pero el principio de la separación geográfica como barrera para la reproducción puede aplicarse a animales situados en diferentes lados de un desierto, de una cadena de montañas, un río, o incluso una carretera. Puede aplicarse también a animales que no estén separados por ninguna otra barrera excepto la mera distancia. Las musarañas de España no pueden cruzarse con las musarañas de Mongolia, y pueden divergir, desde un punto de vista evolutivo, incluso si existiese una cadena ininterrumpida de cruzamientos entre musarañas que conectase España con Mongolia. Sin embargo, la idea de separación geográfica como clave de la especiación es más clara si pensamos en términos de una barrera física real, como el mar o una cadena de montañas. Las cadenas de islas son, probablemente, semilleros fértiles de nuevas especies.

Aquí está, entonces, nuestro cuadro ortodoxo neodarwinista de cómo «nace» una especie típica, por divergencia de una especie ancestral. Comenzaremos con la especie ancestral, una gran población bastante uniforme de animales que se entrecruzan, diseminada a lo largo de una extensión determinada. Podría tratarse de cualquier clase de animales, pero continuemos pensando en las musarañas. La extensión de tierra queda dividida en dos por una cadena de montañas. Se trata de una tierra hostil y no es probable que las musarañas la crucen, pero no es del todo imposible y, ocasionalmente, unas pocas terminan en la llanura del otro lado. Aquí pueden florecer y dar lugar a una población distinta de la especie, aislada de la población principal. Las dos poblaciones procrearán y lo harán por separado, mezclando sus genes a cada lado de las montañas, pero no a través de las mismas. Con el tiempo, cualquier cambio en la composición genética de una población se extenderá, por la reproducción, a través de esta población pero no a través de la otra. Algunos de estos cambios podrían deberse a la selección natural, que puede diferir a los dos lados de la cadena montañosa: difícilmente podríamos esperar que las condiciones atmosféricas, los depredadores y los parásitos, fuesen los mismos a ambos lados. Otros

cambios podrían producirse al azar. Cualquiera que sea la causa que produzca los cambios genéticos, la reproducción tenderá a diseminarlos *dentro* de cada una de las dos poblaciones, pero no *entre* ellas. De este modo, las dos poblaciones divergirán genéticamente: se harán progresivamente más desiguales entre sí.

Se volverán tan diferentes que, después de un tiempo, los naturalistas las contemplarán como pertenecientes a «razas» distintas. Después de un período más largo de tiempo, se habrán separado tanto que serán clasificadas como especies diferentes. Imaginemos que el clima se torne más cálido, de forma que el viaje a través de los pasos montañosos se haga más accesible y que alguna de las nuevas especies comiencen a pasar, gradual e irregularmente, de vuelta a sus territorios ancestrales. Cuando se encuentren con los descendientes de sus primos remotos, habrán divergido tanto en su composición genética que no podrán cruzarse con ellos con buenos resultados. Si se hibridizan con ellos, la descendencia resultante serán seres enfermizos, o estériles, como las maulas. Así pues, la selección natural penaliza cualquier predilección, por parte de los individuos de cada lado, hacia la hibridización con otra especie o incluso raza. La selección natural remata, por tanto, el proceso de «aislamiento reproductor» que comenzó con la intervención casual de una cadena montañosa. La «especiación» se ha completado. Tenemos ahora dos especies donde previamente sólo había una, y ambas pueden coexistir en la misma área sin entrecruzarse.

En realidad, lo probable es que las dos especies no coexistan mucho tiempo. No porque se crucen sino porque entrarán en competición. Es un principio ampliamente aceptado en ecología que dos especies con la misma forma de vida no coexisten mucho tiempo en un mismo sitio, porque compiten entre sí y una u otra se extinguirá. Nuestras dos poblaciones de musarañas podrían no tener por más tiempo la misma forma de vida; por ejemplo, la nueva especie, durante su período de evolución al otro lado de las montañas, podría haber llegado a especializarse en la captura de una clase diferente de insectos. Pero si existe una competitividad significativa entre las dos especies, la mayoría de los ecologistas esperarían que se extinguiese una u otra en el área donde se superponen. Si la que se extingue es la especie ancestral original, diríamos que ha sido reemplazada por una especie nueva, inmigrante.

La teoría de la especiación como resultado de una separación geográfica inicial ha sido, durante largo tiempo, un pilar básico de la corriente principal del neodarwinismo ortodoxo, y todavía se acepta como el principal proceso por el que se produce la existencia de nuevas especies (algunos piensan que existen

también otros procesos). Su incorporación dentro del darwinismo moderno se debió, en gran medida, a la influencia del distinguido zoólogo Ernst Mayr. Lo que hicieron los «interrupcionistas», cuando propusieron su teoría por vez primera, fue preguntarse: Debido a que aceptamos, como muchos neodarwinistas, la teoría ortodoxa de que la especiación comienza con el aislamiento geográfico, ¿qué se supone que veríamos en la historia de los fósiles?

Recordemos la población hipotética de musarañas, con una nueva especie divergiendo en el extremo lejano de una cadena montañosa, volviendo posteriormente a su territorio ancestral, y produciendo, tal vez, la extinción de la especie ancestral. Supongamos que estas musarañas hubiesen dejado restos fósiles, y que la historia fósil fuese *perfecta*, sin intervalos por omisiones desafortunadas de los estadios claves. ¿Qué nos mostrarían estos fósiles? ¿Una transición continua desde la especie ancestral hasta la especie hija? Ciertamente no, por lo menos, si estamos excavando en la extensión de tierra principal donde vivían las musarañas ancestrales originales, y a la que volvieron las de la nueva especie. Hay que pensar en la historia de lo que sucedió en este espacio de tierra. Aquí estaban las musarañas ancestrales, viviendo y reproduciéndose felizmente, sin una razón particular para cambiar. Admitamos que sus primos del otro lado de la montaña se encontraban ocupados evolucionando, pero sus fósiles están al otro lado de la montaña, así que no los encontraremos en la extensión de tierra donde estamos excavando. Entonces, de repente (según estándares geológicos), la nueva especie regresa, compite con la especie principal y, quizá, la reemplaza. De repente, los fósiles que encontramos, según nos movemos hacia los estratos superiores de la extensión principal de tierra, cambian. Antes eran todos de la especie ancestral. Ahora, de una forma abrupta y sin transiciones visibles, aparecen los fósiles de una nueva especie y desaparecen los de la especie antigua.

Los «intervalos», lejos de ser imperfecciones molestas o impedimentos desagradables, resultan ser lo que deberíamos *esperar* desde un punto de vista positivo, si nos tomamos en serio nuestra teoría neodarwinista ortodoxa sobre la especiación. La razón por la que la «transición» desde la especie ancestral a la especie descendiente aparece como abrupta y desigual es que, cuando observamos una serie de fósiles de cualquier lugar, es posible que no estemos observando ningún suceso *evolutivo*: estamos contemplando un suceso *migracional*, la llegada de una nueva especie desde otra área geográfica. Se produjeron sucesos evolutivos, y una especie evolucionó, en realidad, probablemente de una forma gradual, a partir de otra. Pero para ver la transición evolutiva documentada en los fósiles tendríamos que excavar en cualquier sitio; en este caso, al otro lado de las montañas.

Entonces, el punto que establecieron Eldredge y Gould, podría haber sido presentado de manera modesta, como un socorrido rescate de Darwin y sus sucesores, a partir de lo que les había parecido una desagradable dificultad. Así fue, al menos en parte, como se presentó al principio. Los darwinistas siempre se habían preocupado por la discontinuidad aparente de la historia fósil, y parecían forzados a recurrir a alegatos especiales sobre la evidencia imperfecta. El propio Darwin había escrito:

> El registro geológico es extremadamente imperfecto y este hecho explica en gran medida por qué no encontramos un número interminable de variedades que conecten entre sí todas las formas de vida extinguidas con las existentes, a través de unos pasos graduales más finos. Quien rechace este punto de vista sobre la naturaleza del registro geológico, rechazará toda mi teoría.

Eldredge y Gould podrían haber transmitido el siguiente mensaje: No se preocupe, Darwin, incluso si el registro de fósiles *fuese* perfecto, no podría hallar una progresión finamente gradual si excava sólo en un sitio, por la simple razón de que la mayoría de los cambios evolutivos tuvieron lugar ¡en algún otro sitio! Podrían haber arriesgado más, y decir:

> Cuando Darwin decía que el registro de fósiles es imperfecto, lo estaba subestimando. No sólo es imperfecto, sino que existen buenas razones para creer que debería ser *particularmente* imperfecto justo cuando se pone interesante, cuando se están produciendo los cambios evolutivos; esto es en parte porque la evolución tuvo lugar en un sitio diferente de donde encontramos la mayor parte de nuestros fósiles; y en parte, porque incluso si tenemos la suerte de excavar en una de las pequeñas remotas áreas donde transcurrieron la mayoría de los cambios evolutivos, estos cambios (aunque graduales) ocuparían un lapso de tiempo tan corto que necesitaríamos un registro de fósiles extra *rico* para seguir su pista.

Pero no, en lugar de esto, escogieron, especialmente en sus últimos escritos, seguidos con avidez por los periodistas, vender sus ideas como radicalmente *opuestas* a las de Darwin y a la síntesis neodarwinista. Lo hicieron subrayando el «gradualismo» de la visión darwinista de la evolución como opuesta al súbito, desigual y esporádico «interrupcionismo» propio. Ellos, en es-

pecial Gould, incluso vieron analogías entre sus propias ideas y las de las viejas escuelas de «catastrofismo» y «saltacionismo». El saltacionismo ya lo hemos explicado. El catastrofismo fue un intento, en los siglos XVIII y XIX de reconciliar algunas formas de creacionismo con los hechos desazonadores de la historia de los fósiles. Los catastrofistas creían que la aparente progresión en la historia de los fósiles reflejaba, en realidad, una serie de creaciones discretas, cada una de las cuales terminó con una extinción masiva catastrófica. La última de estas catástrofes fue el diluvio de Noé.

Las comparaciones entre el interrupcionismo moderno, por una parte, y el catastrofismo o el saltacionismo, por la otra, tienen una fuerza puramente poética. Son, si puedo acuñar una paradoja, profundamente superficiales. Suenan muy impresionantes en un sentido artístico, literario, pero no hacen nada para ayudar a una comprensión seria, y hasta pueden suministrar una falsa ayuda y un consuelo a los modernos creacionistas, en su lucha con inquietantes buenos resultados para trastocar la educación americana y la publicación de libros de texto. El hecho es que, en su sentido más completo y serio, Eldredge y Gould son tan gradualistas como Darwin o cualquiera de sus seguidores. Comprimieron todos los cambios graduales en breves estallidos, en lugar de dejar que se fueran produciendo según pasara el tiempo; y recalcaron que la mayoría de los cambios graduales transcurren en áreas geográficas lejos de las áreas de donde son extraídos la mayoría de los fósiles.

Así pues, los interrupcionistas no se oponen, en realidad, al *gradualismo* de Darwin; gradualismo significa que cada generación es ligeramente diferente de las generaciones previas; uno tendría que ser un saltacionista para oponerse a esta idea, y Eldredge y Gould no lo son. En lugar de esto, resulta que es la pretendida creencia de Darwin en la constancia del ritmo de la evolución, la que ellos y otros pretendidos interrupcionistas objetan. Porque piensan que la evolución (una evolución innegablemente gradualista aún) se produce con rapidez durante estallidos de actividad relativamente breves (sucesos de especiación, que facilitan una clase de atmósfera de crisis, en los que se rompe la supuesta resistencia normal a los cambios evolutivos); y que la evolución tiene lugar muy lentamente o no tiene lugar durante los largos períodos estáticos intermedios. Cuando decimos «relativamente» breves queremos decir, por supuesto, breves con relación a la escala de tiempo geológica. Incluso los saltos evolutivos de los interrupcionistas, aunque puedan ser instantáneos para estándares geológicos, tienen una duración que se mide en decenas o centenas de miles de años.

Un pensamiento de un famoso evolucionista americano, G. Ledyard Stebbins, resulta revelador. Stebbins no se preocupa específicamente por la evolución desigual, sino que busca dramatizar la velocidad a la que pueden producirse los cambios evolutivos, cuando se observan frente a la escala del tiempo geológico disponible. Se imagina una especie de animal de un tamaño aproximado al de un ratón. Supone entonces que la selección natural comienza a favorecer un aumento del tamaño corporal, pero muy leve. Quizá los machos más grandes gocen de una ligera ventaja en la competición por las hembras. En cualquier momento, los machos de un tamaño medio tendrían un éxito menor que los machos que son un poquito más grandes que la media. Stebbins adjudicó una cifra exacta a la ventaja matemática de que disfrutaban los grandes animales en su ejemplo hipotético. Le dio un valor tan pequeño que no podría ser medido por observadores humanos. El ritmo de cambio evolutivo originado sería también tan pequeño que no se notaría durante un período de tiempo equivalente a una vida humana. Por tanto, en lo que respecta a los científicos que estudian la evolución sobre el terreno, estos animales no estarían evolucionando. Sin embargo, sí lo hacen, de forma muy lenta, a un ritmo que viene dado por el supuesto matemático de Stebbins, e incluso con ese ritmo tan lento, alcanzarían, eventualmente, el tamaño de un elefante. ¿Cuánto tardaría en ocurrir? Mucho tiempo para estándares humanos, pero éstos no son relevantes. Estamos hablando de tiempo geológico. Stebbins calcula que con este supuesto ritmo, los animales tardarían unas 12 000 generaciones en evolucionar desde un peso medio de 40 gramos (tamaño de un ratón) hasta un peso medio de más de 6 000 000 de gramos (tamaño de un elefante). Asumiendo un tiempo de cinco años para cada generación, más largo que el de un ratón, pero más corto que el de un elefante, 12 000 generaciones ocuparían unos 60 000 años. Es un período demasiado corto para ser medido por los métodos geológicos ordinarios, los que localizan las fechas de la historia de los fósiles. Como dice Stebbins: «El origen de un nuevo tipo de animal en 100 000 años, o menos, es contemplado por los paleontólogos como "súbito" o "instantáneo".»

Los interrupcionistas no hablan de saltos en la evolución, sino de episodios en los que la evolución marcha con relativa rapidez. E incluso estos episodios no tienen que ser rápidos para estándares humanos, para que parezcan instantáneos a los estándares geológicos. Cualquier cosa que podamos pensar de la teoría de los equilibrios interrumpidos, es demasiado fácil confundir el gradualismo (la creencia mantenida por los interrupcionistas modernos y por Darwin, de que no hay saltos súbitos

entre una generación y la siguiente) con el «aceleracionismo evolutivo constante» (opuesto por los interrupcionistas y, supuestamente, aunque en realidad, no mantenido por Darwin). No son la misma cosa. La forma correcta de caracterizar las creencias de un interrupcionista es: «gradualista, pero con largos períodos de *estasis* (estancamiento evolutivo), interrumpidos por breves episodios de cambios rápidos graduales». El énfasis se pone en los largos períodos *estáticos*, como un fenómeno que ha sido previamente pasado por alto y que, en realidad, necesita una explicación. La contribución real de los interrupcionistas radica en este énfasis en los períodos estáticos, no en su aireada oposición al gradualismo, ya que ellos son tan gradualistas como cualquier otro.

Este énfasis en los períodos estáticos puede encontrarse de una forma menos exagerada en la teoría de la especiación de Mayr. Él creía que, de las dos razas separadas geográficamente, es menos probable que cambie la gran población ancestral original, que la nueva población «hija» (en el caso de las musarañas de nuestro ejemplo, al otro lado de las montañas). No es sólo porque la población hija sea la que se ha movido hacia nuevos pastos, donde es probable que las condiciones sean diferentes y cambien las presiones de la selección natural. También porque hay algunas razones teóricas (que Mayr subrayó, pero cuya importancia puede discutirse) para pensar que las grandes poblaciones que se reproducen entre sí tienen una tendencia inherente a *resistirse* a los cambios evolutivos. Una analogía adecuada sería la inercia de un objeto grande y pesado, que hace difícil desviarlo. Las poblaciones pequeñas, remotas, por el hecho de ser pequeñas, es más probable, según esta teoría, que cambien, que evolucionen. Por tanto, aunque hablé de que las dos poblaciones de razas de musarañas divergían entre sí, Mayr preferiría ver la población ancestral original, relativamente estática, y la nueva población divergiendo de ella. La rama del árbol evolutivo no se bifurcaría en dos ramitas iguales: habría un tronco principal con una ramita lateral brotando de él.

Los defensores del equilibrio interrumpido tomaron esta sugerencia de Mayr, y la exageraron dentro de la creencia firme de que los períodos estáticos, o ausencia de cambios evolutivos, son normas para una especie. Creen que hay fuerzas genéticas en las grandes poblaciones que se resisten activamente a los cambios evolutivos. Para ellos, los cambios evolutivos constituyen un suceso raro, que coincide con la especiación. Coincide en el sentido de que, desde su punto de vista, las condiciones bajo las cuales se forman nuevas especies —separación geográfica de pequeñas subpoblaciones aisladas— son las condiciones exactas

bajo las cuales las fuerzas que se *resisten* normalmente a los cambios evolutivos se relajan, o desaparecen. La especiación es un momento de cambio, o revolución. Durante estos momentos de cambio se concentran los cambios evolutivos. En contraposición a la mayor parte de su historia, la descendencia permanece estancada.

No es cierto que Darwin creyese que la evolución sigue su curso a un ritmo constante. No lo creía en el sentido ridículamente extremo que satiricé en mi parábola de los hijos de Israel, y no hay que pensar que lo creyese en cualquier sentido importante. La cita del siguiente pasaje, muy conocido, de la cuarta edición (y las posteriores) de *The Origin of Species (El origen de las especies)* le molesta a Gould porque le parece que no es representativa del pensamiento general de Darwin:

> Muchas especies, una vez formadas, no sufren cambios adicionales de ningún tipo...; y los períodos durante los cuales las especies sufren modificaciones, aunque largos, si se miden en años, son probablemente cortos en comparación con los períodos durante los cuales retienen la misma forma.

Gould quiere quitar importancia a esta sentencia, y otras similares, al decir:

> No se puede escribir la historia mediante la citación selectiva y la búsqueda de anotaciones a pie de página. Los criterios adecuados son el contenido general y el impacto histórico. Los contemporáneos o los descendientes de Darwin ¿le leyeron alguna vez como a un saltacionista?

Gould está en lo correcto sobre el contenido general y el impacto histórico, pero la última sentencia de esta cita suya es un *paso en falso* muy revelador. *Por supuesto*, nadie ha leído nunca a Darwin como un saltacionista y, por supuesto, Darwin fue hostil al saltacionismo, pero lo esencial es que éste no es el tema; estamos tratando el equilibrio interrumpido. Como he recalcado, la teoría del equilibrio interrumpido, en la propia descripción de Eldredge y Gould, no es una teoría saltacionista. Los saltos que postulan no son reales en una sola generación. Se extienden a lo largo de un gran número de generaciones, a lo largo de períodos de, según estimaciones de Gould, quizá decenas de millares de años. La teoría del equilibrio interrumpido es una teoría gradualista, aunque destaque la existencia de largos períodos estáticos intercalados entre estallidos *relativamente* cortos de evolución gradualista. El propio Gould se ha despista-

do por su énfasis retórico en la semejanza puramente poética o literaria entre el interrupcionismo, por una parte, y el verdadero saltacionismo por la otra.

Pienso que se aclararían algunos temas, si resumiera una variedad de posibles puntos de vista sobre el ritmo de la evolución. Por un lado, tenemos el verdadero saltacionismo, que ya he tratado lo suficiente. No existen verdaderos saltacionistas entre los biólogos modernos. Toda persona que no es un saltacionista es un gradualista, y esto incluye a Eldredge y a Gould, independientemente de cómo prefieran llamarse ellos mismos. Dentro del gradualismo, podemos distinguir varias creencias sobre el ritmo de la evolución (gradual). Algunas de estas creencias, como hemos visto, muestran una semejanza puramente superficial («literaria» o «poética») con el verdadero saltacionismo antigradualista, y es por lo que se confunden, a veces, con esta teoría.

Por otro lado, tenemos el tipo de «aceleracionismo constante» que caricaturicé en la parábola del Éxodo, con la que empecé este capítulo. Un aceleracionista constante extremo cree que la evolución sigue su camino de manera constante e inexorable todo el tiempo, exista o no cualquier ramificación o especiación en marcha. Cree que la magnitud del cambio evolutivo es estrictamente proporcional al tiempo transcurrido. Irónicamente, una forma de aceleracionismo constante se ha visto muy favorecida entre los modernos genetistas moleculares. Puede establecerse una buena tesis en la creencia de que los cambios evolutivos a nivel de las moléculas proteicas siguen realmente su camino con una velocidad constante, como los hipotéticos hijos de Israel; y esto, aunque las características externamente visibles como los brazos y las piernas estén evolucionando de otra manera, con muchas interrupciones. Ya nos hemos encontrado este tópico en el capítulo 5, y lo mencionaré de nuevo en el próximo. Pero en lo que respecta a la evolución adaptativa de estructuras a gran escala y de patrones de conducta, prácticamente todos los evolucionistas rechazarían el aceleracionismo constante, y Darwin ciertamente lo hubiera hecho. Todo aquel que no es un aceleracionista (progresista) constante, es un aceleracionista variable.

Dentro de los aceleracionistas variables, podemos distinguir dos tipos de creencias, denominadas «aceleracionismo variable discontinuo o *discreto*» y «aceleracionismo variable continuo». Un «discretista» extremo no sólo cree que varía la velocidad de la evolución. Piensa que la evolución da grandes saltos de un nivel discreto a otro, de una manera abrupta, como la caja de cambios de un coche. Podría creer, por ejemplo, que la evolución tiene sólo dos velocidades: muy rápido y parado (no puedo

evitar recordar aquí mi primer informe escolar, escrito por la maestra sobre mi rendimiento de niño de siete años doblando la ropa, tomando baños fríos, y otras acciones rutinarias diarias de la vida escolar: «Dawkins tiene sólo tres velocidades: lento, muy lento y parado»). La evolución «parada» es el «éxtasis» que los interrupcionistas piensan que caracteriza a las grandes poblaciones. La evolución a toda marcha sería la evolución que transcurre durante la especiación, en pequeñas poblaciones aisladas, alrededor de los límites de las grandes poblaciones estáticas, desde un punto de vista evolutivo. De acuerdo con este punto de vista, la evolución estaría siempre en una de estas dos marchas, nunca en medio. Eldredge y Gould muestran una tendencia en dirección del discontinuismo, y en este aspecto son genuinamente radicales. Se les puede llamar «aceleracionistas variables discontinuos». No existe una razón *particular* por la que un aceleracionista variable discontinuo debiera, necesariamente, subrayar la especiación como el tiempo que dura la evolución a toda marcha. En la práctica, sin embargo, la mayoría de ellos lo hacen.

Los «aceleracionistas variables continuos», por otra parte, creen que el ritmo evolutivo fluctúa constantemente, desde muy rápido a muy lento, y paro, con todos sus estadios intermedios. No ven ninguna razón particular para destacar algunas velocidades sobre otras. Para ellos, los períodos estáticos, en particular, son un caso de evolución ultralenta. Para un interrupcionista hay algo especial en los períodos estáticos. Para él, los períodos estáticos no significan que la evolución sea tan lenta que tenga un ritmo de cero: no son simplemente una falta pasiva de evolución porque no hay ninguna fuerza de empuje a favor del cambio. Representan, más bien, una *resistencia* positiva a los cambios evolutivos. Es casi como si se pensase que las especies se plantearan tomar medidas activas para no evolucionar, *a pesar de* la fuerza de empuje en favor de la evolución.

Hay más biólogos de acuerdo con los períodos estáticos como fenómeno real que sobre sus causas. Tomemos, como ejemplo extremo, al celacanto *Latimeria*. Los celacantos fueron un grupo grande de peces (en realidad, aunque se les llame peces, tienen una relación más cercana con nosotros que con las truchas y el bacalao) que florecieron hace más de 250 millones de años, y al parecer se extinguieron al mismo tiempo que los dinosaurios. He dicho «al parecer» se extinguieron porque en 1938, ante el asombro de la mayoría del mundo zoológico, apareció un pez extraño, de una longitud de casi tres metros, y con unas aletas poco frecuentes, parecidas a unas patas, entre las capturas de un barco pesquero de aguas profundas, fuera de las costas de

Sudáfrica. Aunque había sido casi destruido antes de que se reconociese su incalculable valor, sus restos en descomposición atrajeron la atención de un cualificado zoólogo sudafricano. Tal vez, incapaz de creer lo que veían sus ojos, lo identificó como un celacanto vivo, y lo llamó *Latimeria*. Desde entonces, han sido pescados en la misma área algunos especímenes, y la especie ha sido estudiada y descrita adecuadamente. Es un «fósil viviente», en el sentido de que no ha cambiado prácticamente nada desde los tiempos de sus antepasados fósiles, hace cientos de millones de años.

Así que, tenemos los períodos estáticos. ¿Qué hacer con ellos? ¿Cómo los vamos a explicar? Algunos de nosotros diríamos que la línea de descendencia que conduce hasta el *Latimeria* permaneció inmóvil porque la selección natural no la movió. En cierto sentido, no tenía «necesidad» de evolucionar, porque estos animales habían encontrado una forma de vida en las profundidades del mar, donde las condiciones no cambian mucho. Tal vez, nunca participaron en una carrera de armamentos. Sus primos, los que salieron del agua hacia la tierra firme, evolucionaron porque la selección natural les forzó a hacerlo, bajo diversas condiciones hostiles, incluyendo las carreras de armamentos. Otros biólogos, incluyendo aquellos que se hacen llamar interrupcionistas, podrían decir que la descendencia que conduce hasta los modernos *Latimeria* resistió activamente el cambio, *a pesar de* lo que pudieran haber sido las presiones de la selección natural. ¿Quién está en lo cierto? En el caso concreto del *Latimeria*, es difícil de saber, pero existe una vía con la que, en principio, podríamos asociarnos para encontrarlo.

Seamos ecuánimes, dejemos de pensar en el caso concreto del *Latimeria*. Es un ejemplo llamativo, pero extremo, y no constituye el tipo de ejemplos del que quieran fiarse los interrupcionistas, en particular. Su creencia es que son más frecuentes los ejemplos de períodos estáticos menos extremos, y más a corto plazo; son, realmente, la norma, porque las especies tienen mecanismos genéticos que se resisten activamente al cambio, aunque existan fuerzas de la selección natural que inciten al cambio. Hay un experimento muy simple que, al menos en principio, podemos hacer para probar esta hipótesis. Consiste en tomar poblaciones salvajes e imponer nuestras propias fuerzas de selección sobre ellas. De acuerdo con la hipótesis de que las especies se resisten activamente al cambio, deberíamos encontrar que, si tratamos de criar animales buscando alguna cualidad, las especies deberían clavarse en sus talones, como quien dice, y rehusar moverse, por lo menos durante algún tiempo. Si cogemos ganado e intentamos hacer una crianza selectiva, por ejemplo, para que

produzca mucha leche, deberíamos fracasar. Los mecanismos genéticos de la especie movilizarían sus fuerzas antievolución y lucharían contra la presión del cambio. Si tratamos de que las gallinas desarrollen evolutivamente un ritmo de puesta de huevos más rápido, deberíamos fracasar. Si los toreros, en la prosecución de su desdeñable «deporte», tratan de aumentar el coraje de sus toros mediante una crianza selectiva, deberían fracasar. Estos fracasos serían sólo temporales, por supuesto. Las fuerzas antievolución serían sobrepasadas como un dique que revienta bajo presión y los descendientes se moverían con rapidez hacia un nuevo equilibrio. Deberíamos experimentar alguna resistencia cuando iniciamos un programa nuevo de crianza selectiva.

El hecho es que no fracasamos cuando tratamos de modelar la evolución criando animales y plantas en cautividad de una manera selectiva, ni tampoco experimentamos un período de dificultad inicial. Las especies de plantas y animales están en general dispuestas a ser criadas de una manera selectiva, y los criadores no detectan ninguna evidencia de la existencia de fuerzas intrínsecas antievolución. Si hay algo, es que los criadores experimentan dificultades después de un cierto número de generaciones de crianza selectiva. Ocurre así porque, después de algunas generaciones de crianza selectiva, las variaciones genéticas disponibles se agotan, y tenemos que esperar que se produzcan nuevas mutaciones. Es concebible que los celacantos cesaran en su evolución porque dejaran de producirse mutaciones —quizá porque estaban protegidos de los rayos cósmicos en el fondo del mar— pero nadie, que yo sepa, ha sugerido esto seriamente, y, en cualquier caso, no es lo que los interrupcionistas quieren decir cuando hablan de que las especies tienen construido un mecanismo de resistencia a los cambios evolutivos.

Quieren significar algo más parecido al punto que estaba planteando en el capítulo 7, sobre los genes «cooperadores»: la idea de que hay grupos de genes que están tan bien adaptados entre sí que se resisten a la invasión de nuevos genes mutantes que no son miembros del club. Es una idea bastante sofisticada, y puede hacerse que suene como posible. Por supuesto, fue uno de los soportes teóricos de la idea de la inercia de Mayr, a la que ya me he referido. Sin embargo, el hecho de que siempre que tratamos de criar algo selectivamente no encontremos ninguna resistencia inicial, me sugiere que, si las descendencias transcurren durante muchas generaciones en estado natural sin cambios, no es porque se resistan al cambio, sino porque no existe presión alguna de la selección natural en favor del cambio. No cambian porque los individuos que permanecen igual sobreviven mejor que los individuos que cambian.

Los interrupcionistas son tan gradualistas como Darwin o cualquier otro darwinista; simplemente insertan largos períodos estáticos entre brotes de evolución gradual. Como he dicho, el único aspecto en el que los interrupcionistas difieren de otras escuelas darwinistas es en el énfasis tan marcado que ponen en los períodos estáticos como algo positivo: como una resistencia activa a los cambios evolutivos, más que como una ausencia de cambios evolutivos. Y éste es el único aspecto en el que están probablemente muy equivocados. Me queda por aclarar el misterio de por qué *pensaron* que estaban tan lejos de Darwin y del neodarwinismo.

La respuesta descansa en la confusión entre dos significados de la palabra «gradual», unida a la confusión, que me ha costado mucho disipar pero que permanece en la mente de mucha gente, entre el interrupcionismo y el saltacionismo. Darwin fue un apasionado antisaltacionista, y esto le condujo a insistir, una y otra vez, en la gradación extrema de los cambios evolutivos que estaba proponiendo. La razón es que, para él, los saltos significaban lo que he llamado macromutación tipo Boeing 747; la creación súbita, como la de Palas Atenea de la cabeza de Júpiter, de órganos complejos totalmente nuevos con un solo golpe de la varita mágica genética; unos ojos complejos, totalmente formados, funcionando, en un salto a partir de una piel desnuda, en una sola generación. La razón por la que significaba estas cosas para Darwin es que esto es exactamente lo que significaba para algunos de sus oponentes más influyentes, que creían en ello como uno de los factores principales en la evolución.

El duque de Argyll, por ejemplo, aceptó la evidencia de que la evolución había tenido lugar, pero quería meter de manera subrepticia la creación divina por la puerta de atrás. No estaba solo. En lugar de una creación única, de una vez por todas en el Jardín del Edén, muchos victorianos pensaron que la deidad había intervenido repetidas veces en los puntos cruciales de la evolución. Los órganos complejos como los ojos, en lugar de evolucionar a partir de uno más simple, mediante una lenta gradación, como lo concibió Darwin, se pensó que habían sido creados en un solo instante. Esta gente percibía que la evolución «instantánea», si hubiese tenido lugar, implicaría una intervención sobrenatural: que es en lo que creían. Las razones son las razones estadísticas que he discutido en conexión con los huracanes y el Boeing 747. El saltacionismo tipo 747 es, por supuesto, una forma suavizada de creacionismo. Con otras palabras, la creación divina es lo último en el saltacionismo. Es el último salto desde la arcilla inanimada al hombre totalmente formado. Darwin también lo percibió. En una carta a sir Charles Lyell, el geólogo de más renombre en sus días, le escribió:

> Si estuviese convencido de que necesito estas añadiduras a la teoría de la selección natural, la rechazaría como un desecho... No daría nada por ella, si precisase añadiduras milagrosas en cualquier estadio de la descendencia.

Éste no es un tema despreciable. Desde el punto de vista de Darwin, lo esencial de la teoría de la evolución mediante la selección natural era que facilitaba una descripción no milagrosa de la existencia de adaptaciones complejas. Por si sirve de algo, es también el principal objetivo de este libro. Para Darwin, cualquier evolución que tuviese que ser ayudada por Dios no era evolución. A la luz de esto, es fácil ver por qué Darwin reiteraba continuamente la *gradación* de la evolución. Es fácil ver por qué escribió esta sentencia citada en el capítulo 4:

> Si se pudiera demostrar que existe cualquier órgano complejo, que no hubiese podido ser formado por numerosas modificaciones, ligeras, sucesivas, mi teoría se quebraría por completo.

Ésta es otra forma de observar la importancia fundamental de la gradación para Darwin. Sus contemporáneos, como mucha otra gente hoy en día, tuvieron grandes reparos para creer que el cuerpo humano y otras entidades tan complejas pudieran haber llegado a existir a través de medios evolutivos. Si uno se imagina a la *ameba* unicelular como nuestro remoto antepasado —como, hasta hace poco, estaba de moda hacerlo— se explica que mucha gente encontró difícil llenar el vacío entre la *ameba* y el hombre. Encontraron inconcebible que pudiese emerger algo tan complejo a partir de unos comienzos tan simples. Darwin recurrió a la idea de una serie gradual de pequeños pasos como un medio de sobrepasar esa clase de incredulidad. Nos puede resultar difícil imaginar a una *ameba* transformándose en un hombre, continúa el argumento; pero no es difícil imaginarse a una *ameba* transformándose en otra clase de *ameba* apenas diferente. A partir de aquí, no es difícil imaginársela transformándose en una clase apenas diferente de una clase apenas diferente de..., y así sucesivamente. Como vimos en el capítulo 3, este argumento supera nuestra incredulidad sólo si subrayamos que hay un número extremadamente grande de pasos a lo largo del camino, y más si cada paso es muy pequeño. Darwin estuvo batallando constantemente contra esta fuente de incredulidad, y utilizó siempre la misma arma: el énfasis en el cambio gradual, casi imperceptible, repartido a lo largo de infinitas generaciones.

Merece la pena citar una pieza característica de pensamiento colateral de J. B. S. Haldane en la que combate la misma fuen-

te de incredulidad. Algo parecido a la transición entre una *ameba* y un hombre, señala, sucede en el vientre de cada madre en unos meros nueve meses. Se admite que el desarrollo es un proceso muy diferente de la evolución; sin embargo, cualquier escéptico sobre *la posibilidad* de una transición entre una sola célula y un hombre sólo tiene que contemplar sus propios comienzos fetales para mitigar sus dudas. Espero que no se me considere un pedante, si subrayo, de paso, que la elección de la *ameba* para el título de antepasado honorario la hago siguiendo una caprichosa tradición. Una bacteria hubiese sido una elección mejor, aunque, incluso las bacterias, como las conocemos, son organismos modernos.

Para resumir el argumento, Darwin puso un gran énfasis en la gradación de la evolución, debido a que estaba discutiendo *en contra*: la concepción errónea sobre la evolución que prevalecía en el siglo XIX. El *significado* de «gradual», en el contexto de aquellos tiempos, era «opuesto a la saltación». Eldredge y Gould, dentro del contexto de la última mitad del siglo XX, utilizan «gradual» en un sentido muy diferente. Lo utilizan, aunque no explícitamente, para significar «una velocidad constante», y le contraponen su propia noción de «interrupción». Critican el gradualismo en este sentido de «velocidad constante». Sin duda, están en lo cierto al hacerlo: en su forma extrema, es tan absurdo como mi parábola del Éxodo.

Pero unir esta crítica justificable con una crítica de Darwin es confundir dos significados bastante distintos de la palabra «gradual». En el sentido en el que Eldredge y Gould se oponen al gradualismo, no hay razón para dudar de que Darwin hubiese estado de acuerdo con ellos. En el sentido de la palabra en el que Darwin era un apasionado gradualista, Eldredge y Gould también lo son. La teoría del equilibrio interrumpido es un comentario menor sobre el darwinismo, uno que el propio Darwin podría haber aprobado, si se hubiese discutido el tema en su tiempo. Y, como comentario menor, no merece una especial consideración. La razón por la que ha recibido tanta publicidad, y por la que me he sentido obligado a dedicarle un capítulo de este libro, es que la teoría ha sido vendida —exageradamente por algunos periodistas— como si fuese radicalmente opuesta a los puntos de vista de Darwin y sus sucesores. ¿Por qué?

Hay gente que necesita con desesperación no tener que creer en el darwinismo. Estas personas caen dentro de tres clases principales. Primero, están aquellos que, por razones religiosas, quieren que la propia evolución no sea verdad. Segundo, aquellos que no tienen razones para negar que la evolución haya tenido lugar pero que, a menudo, por razones políticas o ideológicas,

encuentran desagradable el *mecanismo* de la teoría de Darwin. De éstos, algunos encuentran la idea de la selección natural inaceptablemente cruel y despiadada; otros confunden la selección natural con la casualidad, y de aquí «que no tenga sentido», lo cual ofende su dignidad; otros confunden, incluso, el darwinismo con el darwinismo social, que tiene visos racistas y otros visos desagradables. Tercero, hay gente, incluyendo a muchos que trabajan en lo que ellos mismos llaman «medios de comunicación», a quienes les agrada ver planes malogrados, quizá porque constituyen buenos artículos periodísticos; el darwinismo está lo bastante establecido y es lo suficientemente respetable como para resultar tentador.

Cualquiera que sea el motivo, la consecuencia es que si un erudito con reputación respira algo como una insinuación de crítica de algún detalle de la actual teoría darwinista, el hecho es recogido con avidez e inflado fuera de toda proporción. Es tan fuerte esta disposición, que es como si hubiese un potente amplificador, con un micrófono sutilmente sintonizado escuchando cualquier cosa que suene ligerísimamente como una oposición al darwinismo. Es una contrariedad, ya que los argumentos y las críticas serias son de importancia vital para cualquier ciencia, y sería trágico que los estudiosos sintiesen la necesidad de amordazarse a causa de los micrófonos. Huelga decir que el amplificador, aunque potente, no es de alta fidelidad: ¡hay demasiada distorsión! Un científico que susurra con precaución una ligera duda sobre algún matiz del darwinismo actual está expuesto a oír sus palabras alteradas y casi irreconocibles, retumbando y resonando a través de los altavoces que esperan ávidos.

Eldredge y Gould no susurran, ¡gritan con elocuencia y potencia! Lo que gritan suele ser muy sutil, pero el mensaje que van dejando es que hay algo erróneo en el darwinismo. Aleluya, «los científicos» ¡lo dicen ellos mismos! El editor de la revista *Biblical Creation* ha escrito:

> No puede negarse que la credibilidad de nuestra posición científica y religiosa se ha fortalecido en gran medida por el reciente deterioro en la moral neodarwinista. Y esto es algo que debemos aprovechar en su totalidad.

Eldredge y Gould han sido unos valientes campeones en la lucha contra el creacionismo de los *rednecks*. Han aireado sus quejas sobre la utilización equivocada de sus propias palabras, sólo para encontrar que, en *esa* parte de su mensaje, los micrófonos se quedaron mudos de repente. Puedo simpatizar con ellos, porque he tenido una experiencia similar con un conjun-

to de micrófonos diferentes, en este caso sintonizados política en lugar de religiosamente.

Lo que es preciso ahora, alto y claro, es la verdad: que la teoría del equilibrio interrumpido descansa con firmeza en la síntesis neodarwinista. Siempre lo hizo. Se tardará tiempo en deshacer el daño fraguado por la retórica pomposa, pero se logrará. La teoría del equilibrio interrumpido llegará a verse en proporción como una arruga interesante pero de poca importancia sobre la superficie de la teoría neodarwinista. No facilita ninguna base para un «deterioro en la moral neodarwinista», ni tampoco para la demanda de Gould, de que la teoría sintética (otro nombre para el neodarwinismo) «está, efectivamente, muerta». Es como si se diese al descubrimiento de que la Tierra no es una esfera perfecta sino un esferoide ligeramente aplanado, un tratamiento de primera página con el siguiente encabezamiento:

COPÉRNICO EQUIVOCADO. REIVINDICADA LA TEORÍA DE QUE LA TIERRA ES PLANA

Pero, para ser justo, la observación de Gould no estaba dirigida tanto hacia el supuesto «gradualismo» de la síntesis darwinista como hacia otras de sus reclamaciones. Ésta es la afirmación, que discuten Eldredge y Gould, de que toda la evolución, incluso en la escala de tiempo geológico más grande, es una extrapolación de sucesos que tienen lugar dentro de las poblaciones o de las especies. Ellos creen que existe una forma más elevada de selección, que llaman «selección de especies». Pospongo este tema hasta el próximo capítulo, el cual será también el sitio para enfrentarse con otra escuela de biólogos que, sobre una base igualmente endeble, han pasado en algunos casos como antidarwinistas, los llamados «cladistas transformados». Pertenecen al campo general de la taxonomía, la ciencia que se ocupa de la clasificación.

10. EL VERDADERO ÁRBOL DE LA VIDA

Este libro trata principalmente de la evolución como solución al complejo problema del «diseño»; como verdadera explicación de los fenómenos que Paley pensó que probaban la existencia de un relojero divino. Por eso sigo hablando de ojos y ecolocalización. Pero hay otra variedad de cosas que la teoría de la evolución explica. Son los fenómenos de la diversidad: los patrones que muestran los distintos tipos de animales y plantas distribuidos por el mundo, y la distribución de características entre ellos. Aunque estoy interesado principalmente en los ojos y otras piezas de la compleja maquinaria, no debo ignorar este otro aspecto del papel de la evolución, el cual nos ayuda a comprender la naturaleza. Así pues, este capítulo trata sobre taxonomía.

La taxonomía es la ciencia de la clasificación. Para algunas personas, tiene la inmerecida reputación de aburrida, una asociación subconsciente con museos polvorientos y con el olor de los líquidos preservantes, casi como si se confundiera con la taxidermia. De hecho, es cualquier cosa menos aburrida. Es, por razones que no comprendo en su totalidad, una de las áreas más controvertidas de la biología. Tiene interés para los filósofos y para los historiadores. Tiene un papel importante que jugar en cualquier discusión sobre la evolución. Y desde sus filas han llegado algunos de los más osados biólogos modernos de los que pretenden ser antidarwinistas.

Aunque los taxonomistas estudian en especial animales y plantas, cualquier tipo de cosas puede clasificarse: rocas, buques de guerra, libros, estrellas, idiomas. Clasificar con orden puede muy bien representar una medida de conveniencia, una necesidad práctica y, en parte, es verdad. Los libros de una biblioteca no tienen prácticamente utilidad a menos que estén organiza-

dos de una manera no aleatoria, para poder encontrar aquellos que traten sobre un tema determinado cuando se requiera. La ciencia, o puede que sea un arte, del ser bibliotecario es un ejercicio de taxonomía aplicada. Por la misma razón, los biólogos piensan que su trabajo se facilita si se pueden clasificar los animales y plantas en categorías acordadas con sus nombres. Pero decir que esta es la única razón de la taxonomía de animales y plantas sería no comprender la mayor parte de su verdadero sentido. Para los biólogos evolucionistas hay algo muy especial sobre la clasificación de los organismos vivos, algo que no es cierto en cualquier otra clase de taxonomía. De la idea de la evolución surge que hay un solo árbol familiar de todas las cosas vivas, ramificado de una manera correcta y única, y que podemos basar en él nuestra taxonomía. Además de su singularidad, esta taxonomía tiene una propiedad especial, que llamaré «el rompecabezas perfecto» *(perfect nesting)*. Su significado e importancia constituye uno de los temas principales de este capítulo.

Utilicemos una biblioteca como ejemplo de taxonomía no biológica. No existe una solución única al problema de cómo deberían clasificarse los libros en una biblioteca o en una librería. Un bibliotecario podría dividir su colección en las siguientes categorías principales: ciencia, historia, literatura, otras artes, trabajos extranjeros, etc. Cada uno de estos apartados, a su vez, se subdividiría en otros. La sección de ciencias podría tener subdivisiones que comprendan: biología, geología, química, física, etc. Los libros del área de biología podrían subdividirse en estantes dedicados a fisiología, anatomía, bioquímica, entomología, y así sucesivamente. Por último, dentro de cada estante, los libros podrían colocarse por orden alfabético. Los otros departamentos de la biblioteca, el de historia, literatura, idiomas extranjeros, etc., se subdividirían de manera similar. Una biblioteca está, por tanto, dividida jerárquicamente de forma que es posible que un lector pueda ser guiado hasta el libro que quiere. La clasificación jerárquica es conveniente porque permite al usuario encontrar con facilidad su camino entre el conjunto de libros. Por eso mismo en los diccionarios las palabras están ordenadas por orden alfabético.

Pero no hay una jerarquía única por la que se deban ordenar los libros de una biblioteca. Otro bibliotecario podría organizar la misma colección de libros de manera distinta, aunque jerárquica también. Podría, por ejemplo, no tener un apartado de idiomas extranjeros, sino preferir clasificar los libros, independientemente de su idioma, en sus áreas temáticas correspondientes: los libros alemanes de biología en la sección de biología, los libros de historia alemanes en la sección de historia, y

así sucesivamente. Un tercer bibliotecario podría adoptar la política radical de clasificar todos los libros, sobre cualquier tema, por orden cronológico de publicación, dependiendo de ficheros indexados (o su equivalente informatizado).

Estas tres planificaciones de una biblioteca difieren bastante entre sí, pero es probable que funcionaran todas adecuadamente y que los lectores las considerasen aceptables, con la excepción de un colérico anciano, miembro de un club de Londres, a quien oí una vez por la radio reprendiendo con vehemencia a la junta directiva de su club por dar empleo a un bibliotecario. La biblioteca había funcionado durante cien años sin ninguna organización, y él no veía por qué necesitaba organizarse ahora. El entrevistador le preguntó amablemente cómo pensaba él que deberían ordenarse los libros. «¡Los más altos a la izquierda y los más bajos a la derecha!», gritó sin titubear. Las librerías populares clasifican sus libros en secciones que reflejan la demanda popular. En lugar de ciencia, historia, literatura, geografía, etc., sus principales departamentos son jardinería, cocina, «títulos de la TV», ocultismo, e incluso una vez vi un estante con un rótulo prominente que indicaba «RELIGIÓN Y OVNIS».

Así pues, no hay una única solución *correcta* al problema de cómo clasificar libros. Los bibliotecarios pueden mostrar diferencias sensibles sobre la política de clasificación, pero los criterios por los que se ganarán o perderán los argumentos no incluirán la «veracidad» o la «corrección» de un sistema de clasificación respecto a otro. Más bien, los criterios que se esgrimirán como argumento serán «la conveniencia para los usuarios de la biblioteca», «la rapidez para encontrar los libros», etc. En este sentido, puede decirse que la taxonomía de los libros en una biblioteca es arbitraria. Lo cual no implica que no sea importante idear un buen sistema de clasificación; nada más lejos de ello. Lo que significa es que no hay un solo sistema de clasificación al que, en un mundo perfecto de información, pudiera llegarse por acuerdo universal como la única clasificación correcta. La taxonomía de las criaturas vivas, por otra parte, según veremos, tiene esta marcada propiedad que le falta a la de los libros; por lo menos, si lo asumimos desde un punto de vista evolutivo.

Es posible idear un número cualquiera de sistemas para clasificar a las criaturas vivas, pero demostraré que todas, excepto una, son tan arbitrarias como la taxonomía de cualquier biblioteca. Si es simple conveniencia lo que se precisa, un conservador de museos podría clasificar sus especímenes de acuerdo con su tamaño y las condiciones necesarias para su almacenamiento: grandes especímenes disecados; pequeños especímenes disecados en bandejas, sujetos a tableros de corcho con alfileres; es-

pecímenes fijados en frascos; especímenes microscópicos en portas de vidrio, etc. Estas agrupaciones de conveniencia son frecuentes en los parques zoológicos. En el Zoológico de Londres los rinocerontes se albergan en la «Casa de los Elefantes», sólo porque necesitan el mismo tipo de jaulas sólidamente reforzadas que los elefantes. Un biólogo práctico podría clasificar los animales en dañinos (subdivididos en plagas de interés médico, plagas de interés agrícola y animales que muerden o pican y son directamente peligrosos), beneficiosos (subdivididos de manera similar) y neutros. Un especialista en nutrición podría clasificar los animales de acuerdo con su valor nutritivo para los seres humanos, de nuevo con una elaborada subdivisión en categorías. Mi abuela bordó una vez un libro en tela para niños sobre animales, clasificándolos por sus patas. Los antropólogos han documentado numerosos sistemas de taxonomía animal, muy elaborados, utilizados por distintas tribus del mundo.

Pero de todos los sistemas de clasificación imaginables, sólo hay uno al que se puedan aplicar palabras como «correcto» o «incorrecto», «verdadero» o «falso» de perfecto acuerdo dada una información perfecta. Este sistema único se basa en las relaciones evolutivas. Para evitar confusiones, daré a este sistema el nombre que los biólogos dan a su forma más estricta: taxonomía cladística *(cladistic)*.

En la taxonomía cladística, el criterio fundamental para agrupar organismos es la cercanía de su parentesco o, en otras palabras, la relativa novedad de su pasado común. Los pájaros, por ejemplo, se distinguen de los no pájaros por el hecho de que descienden de un antepasado común, que no es un antepasado de los no pájaros. Los mamíferos son descendientes de un antepasado común, que no es un antepasado de los que no son mamíferos. Los pájaros y los mamíferos tienen un antepasado común más remoto, que comparten con otros muchos animales, como las serpientes, los lagartos y los tuataras. Los animales descendientes de este antepasado común se llaman amniotas. Así que los pájaros y los mamíferos son amniotas. El término «reptiles» no es un verdadero término taxonómico de acuerdo con los cladistas, porque se define por exclusión: todos los amniotas, excepto los pájaros y los mamíferos. En otras palabras, el antepasado común más reciente de todos los «reptiles» (serpientes, tortugas, etc.) es también el antepasado de algunos animales que no son reptiles, los pájaros y mamíferos.

Dentro de los mamíferos, las ratas y los ratones comparten un antepasado común reciente; los leopardos y los leones comparten otro; también lo hacen los chimpancés y los seres humanos. Los animales estrechamente relacionados son aquellos que

comparten un antepasado común reciente. Los animales menos relacionados comparten un antepasado común más antiguo. Los organismos no pueden tener una *ausencia* total de relación entre sí, ya que es casi cierto que la vida tal como la conocemos se originó sólo una vez en la Tierra.

La verdadera taxonomía cladística es estrictamente jerárquica, expresión que utilizaré para significar que puede representarse como un árbol cuyas ramas siempre divergen y nunca convergen de nuevo. Desde mi punto de vista (algunas escuelas de taxonomistas que estudiaremos más adelante estarían en desacuerdo), es estrictamente jerárquica no porque la clasificación jerárquica sea conveniente, como la clasificación de un bibliotecario, ni tampoco porque todas las cosas en el mundo caigan dentro de un patrón jerárquico, sino porque el patrón evolutivo de la descendencia es jerárquico. Una vez que el árbol de la vida se ramifica más allá de una cierta distancia mínima (básicamente los límites entre especies), las ramas nunca se juntan de nuevo (puede haber excepciones muy raras, como en los orígenes de la célula eucariota mencionados en el capítulo 7). Los pájaros y los mamíferos son descendientes de un antepasado común, pero ahora son ramas separadas del árbol evolutivo, y nunca se volverán a juntar: nunca habrá un híbrido entre un pájaro y un mamífero. Un grupo de organismos que tenga esta propiedad de ser todos descendientes de un antepasado común, que no sea antepasado de un animal que no sea miembro del grupo, se denomina una *clade*, derivada de la palabra griega que designa una rama de un árbol.

Otra forma de representar esta idea de jerarquía estricta es en términos del *rompecabezas perfecto*. Escribimos los nombres de cualquier grupo de animales en una hoja grande de papel y dibujamos círculos alrededor de los grupos relacionados. Por ejemplo, la rata y el ratón estarían unidos dentro de un pequeño círculo, para indicar que son primos cercanos, con un antepasado común reciente. El conejillo de indias y el capibara estarían unidos dentro de otro pequeño círculo. El círculo rata/ratón y el círculo conejillo de indias/capibara estarían unidos, a su vez (y con los castores, puercos espines, ardillas y otros muchos animales), dentro de un anillo mayor, etiquetado con su propio nombre, roedores. Se puede decir que los círculos internos están «encajados» dentro de los círculos externos, más grandes. En algún otro lugar del papel, los leones y los tigres estarían unidos dentro de un pequeño círculo. Este círculo estaría incluido junto con otros en un círculo denominado gatos. Los gatos, perros, musarañas, osos, etc., estarían todos unidos en una serie de círculos dentro de círculos, dentro de un solo círculo

grande, denominado carnívoros. El círculo de roedores y el de carnívoros participarían entonces en una serie más global, de círculos dentro de círculos, en un círculo muy grande, denominado mamíferos.

Lo importante sobre este sistema de círculos dentro de círculos es que están *perfectamente encajados*. Nunca, ni siquiera en una sola ocasión, los círculos que dibujamos se cortarán entre sí. Si tomamos dos círculos cualesquiera que se superpongan, será cierto decir que uno descansa totalmente dentro del otro. El área delimitada por el círculo interior estará siempre dentro del círculo exterior: nunca hay superposiciones parciales. Esta propiedad del encaje taxonómico perfecto no la exhiben los libros, idiomas, tipos de suelo, o escuelas de pensamiento filosófico. Si un bibliotecario dibuja un círculo alrededor de los libros de biología, y otro alrededor de los de teología, encontrará que los dos círculos se superponen. En la zona superpuesta habrá libros con títulos como *Biología y fe cristiana*.

A primera vista, podríamos esperar que la clasificación de los idiomas exhibiese esta propiedad del rompecabezas perfecto. Los idiomas, como vimos en el capítulo 8, evolucionan de una manera similar a los animales. Los idiomas que han divergido recientemente a partir de un tronco común, como el sueco, el noruego y el danés, son mucho más similares entre sí que con idiomas que divergieron hace más tiempo, como el islandés. Pero los idiomas no sólo divergen, también convergen. El inglés moderno es un híbrido formado entre los lenguajes germánico y romance, que habían divergido mucho antes y, por tanto, el inglés no encajaría en ningún diagrama jerárquico. Los círculos que contuviesen el inglés se cortarían entre sí, y se superpondrían parcialmente. Los anillos de clasificación biológica nunca se cortan de esa manera, porque la evolución biológica por encima del nivel de especies es siempre divergente.

Volviendo al ejemplo de la biblioteca, ningún bibliotecario puede evitar el problema de los libros que pertenecen a más de una sección o las superposiciones. No es útil albergar las secciones de biología y teología una al lado de la otra y poner los libros que pertenecen a ambas en el corredor entre ellas, porque entonces ¿qué haríamos con los libros que pertenecen a la vez a la biología y la química, la física y la teología, la historia y la teología, la historia y la biología? Pienso que tengo razón al decir que el problema de los libros que pertenecen a más de una sección es inherente a todos los sistemas taxonómicos distintos del que surge a partir de la biología evolutiva. Es un problema que casi me produce molestias físicas, cuando intento realizar las modestas tareas de archivo que se originan en mi vida

profesional: ordenar en los estantes mis propios libros, y las separatas de artículos científicos que me envían mis colegas (con la mejor de sus intenciones), archivar los papeles administrativos, las cartas viejas, etc. Sin importar las categorías que uno adopte en un sistema de catalogación, habrá siempre detalles que no encajen, y la incómoda indecisión me conduce, lamento decirlo, a dejar los artículos extraños fuera, sobre la mesa, algunas veces durante años, hasta que me deshago de ellos. A menudo, uno tiene el recurso poco satisfactorio de crear una categoría de «varios», que, una vez iniciada, presenta una amenazante tendencia al crecimiento. A veces, me pregunto si los bibliotecarios y los conservadores de museos, excepto los biológicos, no serán particularmente propensos a las úlceras.

En la taxonomía de las criaturas vivas no se originan estos problemas de catalogación. No hay animales «varios». Mientras nos mantengamos por encima del nivel de especie, y estudiemos sólo animales modernos (o animales en un período de tiempo determinado: véase más adelante) no habrá extrañas categorías intermedias. Si un animal parece estar dentro de una extraña categoría intermedia, es decir, se asemeja a una categoría intermedia entre un mamífero y un pájaro, un evolucionista puede confiar en que *tiene* que ser definitivamente una u otra. La apariencia de categorías intermedias debe de ser una ilusión. El desafortunado bibliotecario no puede tener esa seguridad. Es posible que un libro pertenezca, simultáneamente, a los departamentos de historia y de biología. Los biólogos con una orientación cladística no cederían ante los argumentos de los bibliotecarios sobre si sería «conveniente» clasificar a las ballenas como mamíferos, como peces, o como una categoría intermedia entre ambos. El único argumento que tenemos es uno factual. En este caso, los hechos conducen a todos los biólogos modernos a la misma conclusión. Las ballenas son mamíferos, no peces, y no son, en modo alguno, animales intermedios. No están más cerca de los peces de lo que lo están los seres humanos, o los ornitorrincos con pico de pato, o cualquier otro mamífero.

Por supuesto, es importante comprender que todos los mamíferos —hombres, ballenas, ornitorrincos con pico de pato, y el resto— están *igual* de cerca de los peces, ya que todos están ligados a los peces a través del mismo antepasado común. El mito de que los mamíferos, por ejemplo, forman una escalera o una «escala» con las especies «inferiores» más cerca de los peces que las «superiores», es una muestra de esnobismo que no se debe a la evolución. Es una vieja noción preevolutiva, llamada a veces la «gran cadena de la existencia», que debería haber sido destruida por la evolución pero que fue, misteriosamente, asi-

milada por la noción que mucha gente tenía del proceso evolutivo.

Llegado este punto, no puedo resistir llamar la atención hacia la ironía del desafío que les gusta lanzar a los creacionistas contra los evolucionistas: «Producid vuestras categorías intermedias. Si la evolución fuese cierta, debería haber animales que estuviesen a medio camino entre un gato y un perro, o entre una rana y un elefante. Pero ¿alguien ha visto alguna vez un ranolefante?» Me han enviado panfletos creacionistas que intentan ridiculizar la evolución con dibujos de grotescas quimeras, la parte trasera de un caballo unida, por ejemplo, a la parte anterior de un perro. Los autores parecen imaginar que los evolucionistas deberían creer que existen estos animales intermedios. Esto no sólo no comprende el verdadero sentido de la evolución, sino que es su exacta antítesis. Una de las mayores expectativas que nos aporta la teoría de la evolución es que *no* deberían existir animales intermedios de esta clase. Aquí es donde descansa el peso de mi comparación entre los animales y los libros de una biblioteca.

La taxonomía de los seres vivos evolucionados tiene, entonces, la propiedad única de facilitar un acuerdo perfecto en un mundo con una información perfecta. Es lo que quiero decir cuando advierto que podrían aplicarse palabras como «verdadero» o «falso» a las afirmaciones de la taxonomía cladística, aunque no a las de la taxonomía de cualquier bibliotecario. Debemos establecer dos condiciones. Primero, en el mundo real no tenemos una información perfecta. Los biólogos pueden estar en desacuerdo sobre los linajes, y las disputas pueden ser difíciles de resolver debido a la información tan imperfecta: decimos que no hay suficientes fósiles. Volveré sobre esto. Segundo, si tenemos *demasiados* fósiles, se origina otro tipo de problemas. La discontinuidad nítida y definida de la clasificación se evaporará si tratamos de incluir a todos los animales que han vivido en algún momento, en lugar de incluir sólo los actuales. El motivo se debe a que no importa a qué distancia se encuentren entre sí dos animales modernos —un pájaro y un mamífero—, en algún momento tuvieron un antepasado común. Si nos enfrentamos con el problema de tratar de encajar a este antepasado dentro de nuestra clasificación moderna, podemos tener problemas.

En cuanto comencemos a considerar los animales extinguidos ya no será cierto que no hay animales intermedios. Por el contrario, ahora tenemos que enfrentarnos con una serie potencialmente continua de animales intermedios. La distinción entre los pájaros actuales, y otros animales actuales que no son pájaros, como los mamíferos, está bien definida porque los estadios intermedios que convergen hacia atrás en un antepasado común están todos muertos. Para reforzar este punto, habría que pensar de nuevo en una naturaleza hipotéticamente «amable», que nos facilitase un registro completo de fósiles, con un fósil de cada animal que haya vivido. Cuando introduje esta fantasía en el capítulo anterior, mencioné que, de alguna manera, la naturaleza era bastante *poco amable*. Pensaba entonces en el trabajo de estudiar y describir todos los fósiles, pero ahora llegamos a otro aspecto de esta paradójica falta de amabilidad. Un registro fósil completo haría muy difícil la clasificación de animales en grupos distintos a los que se pudiera dar un nombre. Si tuviéramos un registro fósil completo, tendríamos que renunciar a los nombres concretos y recurrir a algún tipo de notación matemática o gráfica para describir las escalas imperceptibles. La mente humana prefiere los nombres concretos, de manera que no está mal que el registro fósil sea escaso.

Si consideramos todos los animales que han vivido en un momento dado, en lugar de considerar sólo los animales modernos, palabras como «hombre» y «pájaro» llegarían a ser tan difusas y poco claras como «alto» y «gordo». Los zoólogos pueden discutir, sin llegar a un acuerdo, si un fósil determinado es o no un pájaro. Con frecuencia, discuten esta misma cuestión acerca del famoso fósil *Archaeopteryx*. Si la distinción entre «pájaro/no pájaro» es más clara que la distinción entre «alto/bajo», es sólo porque en el primer caso los estadios intermedios extraños están todos muertos. Si llegase una plaga curiosamente selectiva y matase a todas las personas de talla media, «alto» y «bajo» llegarían a tener un significado tan preciso como «pájaro» o «mamífero».

No sólo es la clasificación zoológica la que se ha salvado de una extraña ambigüedad por el hecho conveniente de que la mayoría de los animales intermedios se hayan extinguido. Lo mismo ocurre con la ética y las leyes humanas. Nuestros sistemas legales y morales están muy ligados a la especie. El director de un zoológico está legalmente autorizado a «suprimir» un chimpancé que represente un excedente para sus necesidades, mientras que cualquier sugerencia de «suprimir» un guardián o un vendedor de entradas prescindible se recibiría con gritos de verdadera indignación. El chimpancé es propiedad del zoo. Los hombres, se supone, no son propiedad de nadie y, aun así, el razonamiento para discriminar de este modo a los chimpancés no se explica con claridad, ni creo que pueda hacerse. Lo mismo ocurre con el soberbio clasismo de nuestra actitud inspirada en el cristianismo, el aborto de un solo zigoto humano (la mayoría

de ellos están destinados, de todas maneras, a abortar espontáneamente) puede originar más interés moral y más justa indignación que la vivisección de un número cualquiera de inteligentes chimpancés adultos. He oído a científicos honestos, liberales, que realmente no tenían intención de diseccionar chimpancés vivos, defender, sin embargo, de manera apasionada, su *derecho* a hacerlo, sin interferencia de la ley. Estas personas suelen ser las primeras en montar en cólera a la menor violación de los derechos *humanos*. La única razón por la que podemos sentirnos a gusto con este doble estándar es que los estadios intermedios entre el hombre y el chimpancé están todos muertos.

El último antepasado común de los hombres y de los chimpancés vivió, tal vez, hace unos cinco millones de años, por supuesto más recientemente que el antepasado común de los chimpancés y los orangutanes, y quizá treinta millones de años más recientemente que el antepasado común de los chimpancés y los monos. Los chimpancés y nosotros compartimos más del 99 por ciento de nuestros genes. Si se descubrieran, en varias islas perdidas alrededor del mundo, supervivientes de todos los estadios intermedios hasta el antepasado común chimpancé/hombre, ¿quién podría dudar de que nuestras leyes y nuestras conveniencias morales resultarían profundamente afectadas, en especial si hubiera, como presumiblemente lo habría, cruzamientos entre especies a lo largo del espectro? Habría que garantizar unos derechos humanos a todo el espectro (votos para los chimpancés), o habría que tener un sistema de leyes discriminatorias similar al *apartheid*, con el que los tribunales decidieran si un individuo determinado sería legalmente un «chimpancé» o un «hombre»; y la gente se preocuparía por los deseos de sus hijas de casarse con uno de «ellos». Supongo que el mundo está ya explorado lo suficiente para no creer que esta fantasía atormentadora llegue a ser cierta algún día. Pero cualquiera que piense que hay algo obvio y evidente sobre los «derechos» humanos, debería reflejar que es una gran suerte el que estos embarazosos animales intermedios no hayan sobrevivido. De manera alternativa, puede ser que si los chimpancés no hubiesen sido descubiertos hasta hoy serían ahora contemplados como los embarazosos animales intermedios.

Los lectores del capítulo anterior podrían subrayar que todo el argumento de que las categorías se difuminan si no nos limitamos a los animales contemporáneos asume que la evolución transcurre a una velocidad constante, en lugar de hacerlo en períodos interrumpidos. Cuanto más se aproxime nuestra visión de la evolución al extremo de un cambio suave, continuo, más pesimista se tornará sobre la posibilidad de aplicar palabras como

pájaro o no pájaro, humano o no humano, a todos los animales que vivieron en algún momento. Un saltacionista extremo podría creer que allí estaba realmente el primer hombre, cuyo cerebro mutante sería dos veces el tamaño del de su padre y del de su hermano, con forma de chimpancé.

Los abogados del equilibrio interrumpido no son, como hemos visto, verdaderos saltacionistas. Sin embargo, para ellos el problema de la ambigüedad de los nombres está destinado a parecer menos grave que con una visión más continua. El problema de las denominaciones se originaría para los puntuacionistas si, literalmente, cada animal que ha vivido en cualquier momento estuviese preservado como un fósil, porque los puntacionistas son, en realidad, gradualistas si los consideramos en detalle. Pero, ya que asumen que no es muy probable que encontremos fósiles que documenten los cortos períodos de transición rápida mientras que es particularmente probable encontrar fósiles que documenten los largos períodos de estasis, el «problema de los nombres» será menos grave desde una visión puntuacionista que desde una visión no puntuacionista de la evolución.

Por eso, los puntuacionistas, en especial Niles Eldredge, dan mucha importancia al tratamiento de «la especie» como una «entidad» real. Para un no puntuacionista, las «especies» sólo pueden definirse porque los estadios intermedios raros están muertos. Un antipuntuacionista extremo, desde una visión panorámica de toda la historia evolutiva entera, no podría ver «las especies» como una entidad discontinua. Sólo vería una mancha continua. Desde su punto de vista, una especie nunca tiene un comienzo definido con claridad, y a veces sólo tiene definido claramente su final «extinción»; con frecuencia, una especie no acaba de una manera terminante sino que evoluciona gradualmente hacia una nueva especie. Un puntuacionista, por otra parte, ve que una especie comienza a existir en un momento determinado (en realidad, hay un período de transición con una duración de decenas de miles de años, pero esta duración es corta para estándares geológicos). Por otra parte, ve que una especie tiene un final definido o, por lo menos, consumado rápidamente, no un desvanecimiento gradual hacia una nueva especie. Como la mayor parte de la vida de una especie, desde un punto de vista puntuacionista, transcurre en un estasis sin cambios, y como las especies tienen un comienzo y un final separados, para un puntuacionista, podría decirse que una especie tiene un «período vital» definido, que puede medirse. Un no puntuacionista no ve que una especie tenga un «período vital» como un organismo individual. Un puntuacionista extremo ve «las especies» como entidades discretas que realmente merecen su propio nombre.

Un antipuntuacionista extremo ve «las especies» como un tramo de un río que fluye de manera continua, elegido arbitrariamente, sin un motivo particular excepto el de trazar las líneas que delimiten su principio y su final.

En un libro puntuacionista sobre la historia de un grupo de animales, por ejemplo, la historia de los caballos a lo largo de los últimos treinta millones de años, los caracteres del drama pueden ser todos especies, en lugar de organismos individuales, porque el autor puntuacionista piensa en las especies como «cosas» reales, con su propia identidad. Las especies llegarían súbitamente a escena, y desaparecerían de igual modo, reemplazadas por las especies sucesorias. Sería una historia de sucesiones, en la que unas especies dan paso a otras. Pero si un antipuntuacionista escribiese la misma historia, utilizaría los nombres de las especies sólo como una vaga conveniencia. Cuando mirase a través del tiempo, dejaría de ver las especies como entidades discontinuas. Los actores reales, en su drama, serían los organismos individuales en las poblaciones que cambian. En su libro serán los animales individuales los que darán paso a los animales individuales de la descendencia, no las especies las que den paso a las especies. No sorprende entonces que los puntuacionistas muestren una tendencia a creer en un tipo de selección natural a nivel de especie, que contemplan como análoga a la selección darwinista, a nivel individual. Los no puntuacionistas, por otra parte, es probable que contemplen la selección natural como si funcionase a un nivel que no está por encima del organismo individual. La idea de «selección de especies» tiene menos atractivo para ellos, porque no piensan en las especies como entidades con una existencia discontinua a través del tiempo geológico.

Éste es un momento apropiado para tratar la hipótesis de la selección de especies, que ha quedado pendiente, en cierto sentido, desde el capítulo anterior. No emplearé mucho tiempo en ello, ya que en *The Extended Phenotype* he explicado con detalle mis dudas sobre su importancia en la evolución. Es cierto que la gran mayoría de especies que han vivido en un momento dado se han extinguido. Es cierto que las nuevas especies comienzan a existir a un ritmo que, al menos, equilibra el ritmo de extinción, de forma que hay un «pool de especies» cuya composición cambia de manera constante. El reclutamiento y la eliminación no casual de las especies de este *«pool»* podría constituir un tipo de selección natural a alto nivel. Es posible que ciertas características de especies influyan en su probabilidad de extinguirse, o de dar origen a otras nuevas. Las especies que vemos por el mundo deberían mostrar una tendencia a tener lo necesario para venir a este mundo —para ser «especiadas»— y para no extinguirse. Si se desea, se le puede denominar una forma de selección natural, aunque sospecho que está más cerca de la selección única que de la cumulativa. Pero soy escéptico en cuanto a la sugerencia de que esta clase de selección tenga mucha importancia para explicar la evolución.

Esto puede reflejar mi punto de vista influenciado por lo que es importante. Como dije al comienzo de este capítulo, lo que espero de una teoría sobre la evolución es que explique los mecanismos complejos, bien diseñados, como los corazones, las manos, los ojos y la ecolocalización. Nadie, ni los más ardientes defensores de la selección de especies, piensa que esta clase de selección pueda lograrlo. Hay quienes piensan que la selección de especies puede explicar algunas tendencias a largo plazo en la historia de los fósiles, como la tendencia frecuentemente observada hacia un tamaño corporal mayor, en el transcurso del tiempo. Los caballos modernos, como los conocemos, son más grandes que sus antepasados de hace treinta millones de años. Los defensores de la selección de especies muestran objeciones a la idea de que esto se produjera a través de una ventaja individual constante: no ven que la tendencia de los fósiles indique que los caballos grandes tuviesen más éxito que los pequeños dentro de sus especies. Lo que piensan que ocurrió es lo siguiente. Había muchas especies, un «pool» de especies. En algunas, el tamaño corporal medio era grande y, en otras, pequeño (quizá porque en algunas especies los caballos grandes fuesen mejores, y en otras lo fuesen los pequeños). Las especies de tamaño grande era menos probable que se extinguiesen (o más probable que dieran origen a nuevas especies como ellos mismos) que las de tamaño pequeño. Sin pensar qué ocurrió, en realidad, de acuerdo con los defensores de la selección de especies, la tendencia de los fósiles hacia un mayor tamaño se debió a una sucesión de *especies* con un tamaño corporal medio progresivamente mayor. Incluso es posible que en la mayoría de las especies fuesen favorecidos los individuos *más pequeños* y, a pesar de ello, la tendencia de los fósiles fuera todavía hacia un tamaño corporal mayor. En otras palabras, la selección de *especies* podría favorecer a esta minoría de especies en las que resultarían favorecidos los individuos más grandes. George C. Williams, el gran neodarwinista, hizo hincapié en este punto, aunque hay que admitir que con un espíritu de abogado del diablo, mucho antes de que apareciesen en escena los modernos defensores de la selección de especies.

Podría decirse que lo que tenemos aquí, y puede que también en todos los supuestos ejemplos de selección de especies,

no es una tendencia evolutiva, sino una tendencia hacia la *sucesión* de estadios, como la tendencia hacia las plantas más y más grandes cuando un trozo de tierra de desecho es colonizado sucesivamente por semillas pequeñas, hierbas más grandes y, finalmente, los árboles del clímax del bosque maduro. De cualquier forma, ya sea que definamos esta tendencia como una sucesión de estadios, o como una tendencia evolutiva, los defensores de la selección de especies pueden estar en lo cierto al creer que es esta clase de tendencia la que ellos, como paleontólogos, enfrentan a menudo, en las sucesivas capas de la historia fósil. Pero, como he señalado, nadie quiere decir que la selección de especies sea una explicación importante para la evolución de las adaptaciones complejas. Aquí está el porqué.

Las adaptaciones complejas no son, en muchos casos, propiedad de las especies, sino de los individuos. Las especies no tienen ojos ni corazón; los individuos sí. Si una especie se extingue por la pobreza de su visión, significa presumiblemente que cada individuo en esta especie murió debido a su escasa visión. La cualidad de la visión es una propiedad de los animales individuales. ¿Qué clase de rasgos característicos puede decirse que tienen las *especies*? La respuesta debería ser aquellos que afectan a su supervivencia y a su reproducción, de una forma que no podría reducirse a la suma de sus efectos sobre la supervivencia y reproducción individuales. En el ejemplo hipotético de los caballos, sugerí que esta minoría de especies en las que los individuos más grandes resultan favorecidos tiene menos probabilidades de extinguirse que la mayoría de las especies en las que se favorece a los individuos más pequeños. Pero no resulta muy convincente. Es difícil pensar alguna razón por la que la posibilidad de supervivencia de la especie debiera separarse de la suma de las posibilidades de supervivencia de los miembros individuales de la misma.

Un caso más claro de rasgos característicos a nivel de especie es el siguiente ejemplo hipotético. Supongamos que en una especie todos los individuos se ganen la vida de la misma manera. Los koalas, por ejemplo, viven en eucaliptos y sólo comen hojas de eucalipto. Las especies como ésta pueden denominarse uniformes. Otras especies pueden tener diversos individuos que se ganan la vida de distintas formas. Cada individuo podría ser tan especializado como un koala, pero la especie en su totalidad mostraría una variedad de hábitos dietéticos. Algunos miembros de la especie no comerían nada que no fueran hojas de eucaliptos; otros nada que no fuese trigo; otros nada que no fuesen batatas; otros nada que no fuesen cáscaras de limón, y así sucesivamente. Llamaremos a esta segunda clase especies variadas.

Ahora, pienso que es fácil imaginarse unas circunstancias en las que fuese más probable que se extinguiesen las especies uniformes que las variadas. Los koalas dependen totalmente del suministro de eucaliptos, por lo que una plaga similar a la de los olmos de tipo holandés acabaría con ellos. En las especies variadas, por otra parte, *algunos* miembros sobrevivirían a cualquier plaga determinada de plantas comestibles, y la especie continuaría. Es también fácil creer que las especies variadas tienen más probabilidades de producir especies hijas, que las uniformes. Aquí quizá hubiera un ejemplo de verdadera selección a nivel de especie. A diferencia de la falta de visión o de la longitud de las patas, la «uniformidad» o la «variedad» son verdaderos rasgos característicos a nivel de especie. Su problema es que son muy escasos.

Una interesante teoría elaborada por el evolucionista americano Egbert Leigh puede interpretarse como candidata a ejemplo de verdadera selección a nivel de especie, aunque fue sugerida antes de que la frase «selección de especies» se pusiese de moda. Leigh estaba interesado en un problema perenne, la evolución del comportamiento «altruista» en los individuos. Reconoció que si los intereses del individuo entrasen en conflicto con los de la especie, los del individuo –intereses a corto plazo– prevalecerían. Parece que nada puede frenar la marcha egoísta de los genes. Pero Leigh hizo la siguiente sugerencia interesante. Debe de haber algunos grupos o especies en los que da la casualidad de que lo que es mejor para el individuo coincide bastante con lo que es mejor para la especie. Y debe de haber otras especies en las que los intereses del individuo se aparten bastante de los de la especie. En igualdad de condiciones, el segundo tipo de especie tendría más probabilidades de extinguirse. Una forma de selección de especies podría favorecer, no el sacrificio individual, sino las especies en las que no se le *pide* al individuo que sacrifique su propio bienestar. Podríamos ver evolucionar entonces un comportamiento altruista, porque la selección de especies habría favorecido aquellas en las que el interés de los propios individuos resulta mejor servido por su aparente altruismo.

Quizás el ejemplo más dramático de un rasgo característico a nivel de especies se refiera al modo de reproducción, sexual versus asexual. Por razones en las que no puedo entrar por falta de espacio, la existencia de la reproducción sexual plantea un gran rompecabezas teórico para los darwinistas. Hace muchos años, R. A. Fisher, hostil a la idea de la existencia de una selección a niveles superiores al de los organismos individuales, estaba preparado para hacer una excepción en el caso de la se-

xualidad. Las especies que se reproducen sexualmente, por razones en las que de nuevo no entraré (no son tan obvias, como se podría pensar), son capaces de evolucionar con más rapidez que las especies que se reproducen asexualmente. Evolucionar es algo que hacen las especies, no los individuos: no se puede hablar de un organismo en evolución. Fisher sugería que la selección a nivel de especie era responsable, en parte, del hecho de que la reproducción sexual fuese tan frecuente entre los animales modernos. Pero si esto es así, estaríamos tratando con un caso de selección única, en lugar de cumulativa.

Cuando se producen especies asexuales, tenderían a extinguirse, de acuerdo con este argumento, porque no evolucionarían con la suficiente rapidez para mantenerse en equilibrio ante los cambios del medio ambiente. Las especies sexuales muestran tendencia a no extinguirse porque pueden evolucionar con la suficiente rapidez como para mantener este equilibrio. Así pues, lo que vemos a nuestro alrededor son en su mayoría especies sexuales. Pero la «evolución» cuyo ritmo varía entre los dos sistemas es, por supuesto, una evolución darwiniana ordinaria por selección cumulativa a nivel individual. La selección de especies es una simple selección única, que escoge entre dos únicos rasgos característicos, asexualidad versus sexualidad, evolución lenta versus evolución rápida. La maquinaria de la sexualidad, los órganos sexuales, la conducta sexual, la maquinaria celular para la división celular sexual, todo debe de haber sido reunido por una selección cumulativa darwiniana estándar, de bajo nivel, *no* por la selección de especies. En cualquier caso, da la casualidad de que el consenso moderno está en contra de la vieja teoría de que la sexualidad se mantiene, por algún tipo de selección, a nivel de grupo o a nivel de especie.

Para finalizar, la selección de especies podría explicar el patrón de especies existente en el mundo en un momento determinado. De aquí se sigue que también podría explicar los cambios de patrón en las especies según van transcurriendo las épocas geológicas, es decir, por los cambios de patrón en el registro fósil. Pero no es una fuerza significativa en la evolución de la compleja maquinaria de la vida. Lo más que puede hacer es escoger entre varias maquinarias complejas alternativas, siempre que éstas hayan sido reunidas previamente por una verdadera selección darwiniana. Como ya he expresado, la selección de especies puede tener lugar pero ¡no parece jugar un papel decisivo! Volveré al tema de la taxonomía y sus métodos.

Dije que la taxonomía cladista tiene la ventaja, sobre las clasificaciones taxonómicas de los bibliotecarios, de que en la naturaleza sólo hay un patrón verdaderamente jerárquico, perfectamente ensamblado, esperando ser descubierto. Todo lo que tenemos que hacer es desarrollar métodos para descubrirlo. Pero se nos presentan dificultades de tipo práctico. El fantasma más importante del taxonomista es la convergencia evolutiva. Es un fenómeno tan importante, que le he dedicado ya medio capítulo. En el capítulo 4 vimos cómo se ha comprobado, una y otra vez, que unos animales se parecen a otros de otras partes del mundo (con los que no tienen ninguna relación), porque tienen formas de vida similares. Las hormigas guerreras del Nuevo Mundo se parecen a las hormigas devastadoras del Viejo Mundo. También se han desarrollado extrañas semejanzas entre los peces eléctricos de África y Sudamérica a pesar de que están bastante poco relacionados; y entre los lobos verdaderos y el «lobo» marsupial *Tylacinus* de Tasmania. En todos esos casos, afirmé, sin justificación, que dichas semejanzas eran convergentes: que evolucionaron de forma independiente en animales que no guardan relación entre sí. Pero ¿cómo sabemos que no están relacionados? Si los taxonomistas utilizan los parecidos para medir la cercanía del parentesco, ¿por qué no fueron engañados por esas extrañas semejanzas que parecen unir a estas parejas de animales? O, para darle la vuelta a la cuestión y hacerla más preocupante, cuando los taxonomistas dicen que dos animales están estrechamente relacionados —por ejemplo, los conejos y las liebres—, ¿cómo sabemos que los taxonomistas no han sido engañados por una convergencia masiva?

Esta cuestión es realmente preocupante, porque la historia de la taxonomía está repleta de casos en los que unos taxonomistas han declarado que sus predecesores estaban equivocados precisamente por este motivo. En el capítulo 4 vimos que un taxonomista argentino había afirmado que los «litopters» eran los antepasados de los verdaderos caballos, mientras que ahora se piensa que son convergentes con los caballos verdaderos. Durante mucho tiempo, se creyó que el puerco espín africano estaba relacionado con los puercos espines americanos pero ahora se piensa que las dos coberturas de espinas han evolucionado de manera independiente en los dos grupos. Presumiblemente, las espinas fueron útiles para ambos en los dos continentes, por razones similares. ¿Quién puede decir que las futuras generaciones de taxonomistas no cambiarán sus criterios? ¿Qué confianza podemos depositar en la taxonomía, si la evolución convergente es una simuladora tan poderosa de semejanzas engañosas? La razón principal por la que me siento optimista es la llegada a escena de técnicas nuevas y poderosas basadas en la biología molecular.

Para recapitular, todos los animales, las plantas y las bacte-

rias, no importa lo diferentes que parezcan entre sí, son sorprendentemente uniformes cuando descendemos a la estructura molecular básica. Esto se ve de una forma más dramática en el propio código genético. El diccionario genético tiene 64 palabras de DNA de tres letras cada una. Cada una de estas palabras tiene una traducción precisa en el lenguaje de las proteínas (bien sea un aminoácido o un signo de puntuación determinado). El lenguaje parece ser arbitrario en el mismo sentido en que lo es un lenguaje humano (no hay nada intrínseco en el sonido de la palabra «casa», por ejemplo, que sugiera al que lo escucha un atributo cualquiera de una vivienda). Una vez establecido esto, es un hecho de gran importancia que las cosas vivas, sin importar lo diferentes que sean respecto a su apariencia externa, «hablen» el mismo lenguaje a nivel de sus genes. El código genético es universal. Para mí, es una prueba casi concluyente de que todos los organismos descienden de un antepasado común. La probabilidad de que se origine dos veces un mismo diccionario con significados «arbitrarios» es muy pequeña. Como vimos en el capítulo 6, puede que alguna vez hayan existido otros organismos que utilizasen un lenguaje genético diferente, pero ya no están entre nosotros. Todos los organismos supervivientes descienden de un antepasado único, del cual han heredado un diccionario genético casi idéntico, aunque arbitrario, respecto a cada una de las 64 palabras de DNA.

Sólo hay que pensar en el impacto de este hecho sobre la taxonomía. Antes de la era de la biología molecular, los zoólogos sólo tenían confianza en el parentesco de aquellos animales que compartían un gran número de características anatómicas. La biología molecular abrió de repente un nuevo cofre del tesoro de las semejanzas que añadir a la escasa lista ofrecida por la anatomía y la embriología. Las 64 identidades (semejanzas es una palabra que no tiene demasiada fuerza) del diccionario genético compartido son el comienzo. La taxonomía se ha transformado. Lo que una vez fueron vagas opiniones de parentesco se ha transformado en cuasi-certeza estadística.

La completa universalidad, palabra por palabra, del diccionario genético es, para el taxonomista, algo demasiado bueno. Una vez que nos ha revelado que todas las cosas vivas están emparentadas, no puede decirnos qué pares tienen un parentesco más estrecho que otros. Pero otras informaciones moleculares sí pueden porque aquí encontramos un grado de semejanza variable en lugar de una identidad total. El producto de la maquinaria genética traductora, recordemos, lo constituyen las moléculas de proteína. Cada una es una frase, una cadena de palabras de aminoácidos del diccionario. Podemos leer estas frases en su forma

traducida de proteínas o en su forma original de DNA. Aunque todas las cosas vivas comparten el mismo diccionario, no elaboran todas las mismas frases con su parte del diccionario compartido. Ello nos ofrece la oportunidad de encontrar varios grados de parentesco. Las secuencias de proteínas, aunque diferentes en los detalles, tienen, en su conjunto, patrones similares. Para cualquier pareja de organismos, podemos encontrar siempre secuencias que son suficientemente similares para ser obviamente versiones ligeramente «alteradas» de la misma secuencia ancestral. Ya lo hemos visto en el ejemplo de las pequeñas diferencias que existen entre las secuencias que codifican las histonas de las vacas y los guisantes.

Los taxonomistas pueden comparar las secuencias moleculares, igual que podrían comprar los huesos del cráneo o de las patas. Puede asumirse que las secuencias estrechamente relacionadas proceden de parientes cercanos; y las secuencias con más diferencias, de parientes más lejanos. Estas secuencias están construidas con el diccionario universal que no tiene más de 64 palabras. La belleza de la biología molecular moderna consiste en que podemos medir con exactitud la diferencia entre dos animales, como el número exacto de palabras que difieren en sus versiones de una secuencia concreta. En términos del hiperespacio genético del capítulo 3, podemos medir cuántos pasos separan un animal de otro, por lo menos respecto de una molécula proteica determinada.

Una ventaja adicional de la utilización de secuencias moleculares en taxonomía es que, de acuerdo con una influyente escuela de genetistas, los «neutralistas» (los encontraremos de nuevo en el próximo capítulo), la mayoría de los cambios evolutivos que transcurren a nivel molecular son *neutrales*. Lo cual significa que no se deben a la selección natural, sino que son fortuitos y, por tanto, que, excepto en algún caso de mala suerte, el fantasma de la convergencia no está aquí para confundir al taxonomista. Un hecho relacionado, como ya hemos visto, es que cualquier clase de molécula parece evolucionar con un ritmo aproximadamente constante en grupos de animales bastante diferentes. Esto significa que el número de diferencias entre moléculas comparables de dos animales, por ejemplo, el citocromo humano y el del jabalí, es una buena medida del tiempo que ha pasado desde que vivió su antepasado común. Tenemos un «reloj molecular» bastante preciso. El reloj molecular nos permite calcular no sólo qué parejas de animales tienen antepasados comunes más recientes, sino también *cuándo* vivieron, aproximadamente.

El lector puede que se sienta ahora confundido, por una apa-

rente incongruencia. Todo este libro subraya la importancia de la selección natural por encima de todo. ¿Cómo puede recalcar la casualidad de los cambios evolutivos a nivel molecular? Para adelantar algo del capítulo 11, no hay en realidad discusión alguna respecto a la evolución de las adaptaciones que son el tema principal de este libro. Ni los más ardientes neutralistas piensan que órganos funcionales complejos, como los ojos y las manos, hayan evolucionado por una tendencia fortuita. Todo biólogo en su sano juicio está de acuerdo en que pueden haber evolucionado por selección natural. Sólo que los neutralistas piensan –correctamente, en mi opinión– que tales adaptaciones son la punta del iceberg: es probable que la mayor parte de los cambios evolutivos, cuando se observan a nivel molecular, no sean funcionales.

En tanto el reloj molecular sea un hecho –y parece cierto que cada clase de molécula cambia más o menos con un ritmo propio característico cada millón de años– podemos utilizarlo para fechar los puntos de ramificación del árbol evolutivo. Si es cierto que la mayoría de los cambios evolutivos son neutros, a nivel molecular, éste sería un maravilloso regalo para los taxonomistas. Significa que podría eliminarse el problema de la convergencia con ayuda de la estadística. Cada animal tiene un gran volumen de textos genéticos escritos en sus células, la mayoría de los cuales, de acuerdo con la teoría neutralista, no tiene nada que ver con la adaptación a su peculiar forma de vida; se trata de un texto que no ha sido afectado por la evolución y que en su mayor parte no está sujeto a la evolución convergente, excepto como resultado del puro azar. La probabilidad de que dos grandes trozos de texto selectivamente neutros puedan parecerse entre sí por pura suerte puede calcularse, y es, por supuesto, muy baja. Aun mejor, el ritmo constante de la evolución molecular nos permite *fechar* los puntos de ramificación en la historia evolutiva.

Es difícil exagerar el poder adicional que han añadido las nuevas técnicas moleculares de lectura de secuencias al arsenal del taxonomista. Por supuesto, todavía no se han descifrado todas las secuencias moleculares en todos los animales, pero uno ya puede pasearse por la biblioteca y buscar palabra por palabra, letra por letra, la fraseología de, por ejemplo, la secuencia de la hemoglobina de un perro, un canguro, un oso hormiguero, un pollo, una víbora, una salamandra, una carpa y una persona. No todos los animales tienen hemoglobina, pero hay otras proteínas, como las histonas, de las que existe una versión en cada animal y en cada planta. No son medidas vagas, como la longitud de una pierna o la anchura de un cráneo, que puedan cambiar con la edad y la salud de la muestra, o incluso con la visión del que mide. Hay versiones de la misma frase con palabras alternativas, en el mismo lenguaje, que pueden colocarse juntas y compararse de manera tan minuciosa y exacta como un estudiante exigente de griego podría hacerlo con dos fragmentos de los mismos evangelios. Las secuencias de DNA son los documentos del evangelio de todas las formas de vida, y nosotros hemos aprendido a descifrarlos.

La hipótesis básica de los taxonomistas es que los parientes cercanos tendrán versiones más similares de una secuencia molecular determinada que los parientes más lejanos. Se le denomina el «principio del ahorro». Ahorro es otro nombre para los recursos económicos. Dado un grupo de animales cuyas secuencias son conocidas, por ejemplo, los citados en el párrafo anterior, nuestra tarea consiste en descubrir cuál de los diagramas ramificados posibles que unen los ocho animales es el más económico. El árbol más económico será el que «necesite menos recursos» para realizar su hipótesis, en el sentido de que suponga el mínimo número de cambios de palabras en la evolución, y la cantidad mínima de convergencia. Tenemos derecho a asumir una cantidad mínima de convergencia sobre una base de pura improbabilidad. Es poco probable, especialmente si la mayor parte de la evolución molecular es neutra, que dos animales que no estén relacionados hubiesen acertado con la misma secuencia, palabra por palabra, letra por letra.

Hay dificultades de cálculo al tratar de buscar todos los árboles posibles Cuando hay sólo tres animales para clasificar, el número de árboles posibles es únicamente de tres: A unido a B, excluyendo a C; A unido a C, excluyendo a B; y B unido a C, excluyendo a A. Pueden hacerse los mismos cálculos, si se quiere clasificar un número mayor de animales, y el número total de árboles posibles aumenta de forma acentuada. Cuando sólo se consideran cuatro animales, el número total de árboles posibles es todavía manejable, ya que es de sólo 15. El ordenador no necesita mucho tiempo para descubrir cuál de los 15 es el más económico. Pero si hay 20 animales en consideración, he calculado que el número total de árboles posibles sería de 8 200 794 532 637 891 559 375 (véase la figura 9). Se ha calculado que el ordenador más rápido en la actualidad tardaría 10 000 millones de años, aproximadamente la edad del universo, para descubrir el árbol más económico para 20 animales. Y los taxonomistas, con frecuencia, quieren construir árboles de más de 20 animales.

Aunque los taxonomistas moleculares han sido los primeros en hacerlo, el problema de trabajar con grandes números ha estado latente en toda la taxonomía no molecular. Los taxonomis-

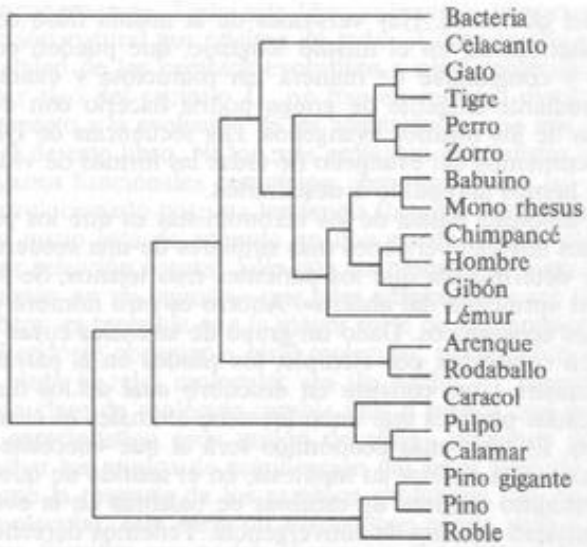


FIGURA 9. El árbol de familias aquí representado es correcto. Hay otras 8 200 794 532 637 891 559 374 maneras de clasificar estos veinte organismos, y todas son incorrectas.

tas moleculares lo han evitado realizando suposiciones intuitivas. De todos los árboles genealógicos posibles que podrían ser tratados, podrían eliminarse grandes cantidades inmediatamente; por ejemplo, todos aquellos millones de árboles concebibles que colocan a los seres humanos más cerca de los gusanos que de los chimpancés. Los taxonomistas no se preocupan por considerar absurdos estos árboles de parentesco, sino que se guían hacia los escasos árboles que no violan de una forma tan drástica su concepción previa. Es posible que esto resulte adecuado, aunque siempre existe el peligro de que el árbol verdaderamente más económico sea uno de aquellos que han sido eliminados sin consideración. Los ordenadores también pueden ser programados para tomar atajos, y, por suerte, el problema de los grandes números puede reducirse.

La información molecular es tan rica, que podemos realizar nuestros estudios taxonómicos por separado, una y otra vez, con proteínas diferentes. Así podemos utilizar nuestras conclusiones, recogidas en el estudio de una molécula, como una comprobación de nuestras propias conclusiones basadas en el estudio de otra molécula. Si estamos preocupados porque la historia contada por una molécula proteica se confunde por la convergencia, podemos comprobarlo mirando otra molécula de proteína. La evolución convergente es un tipo especial de convergencia. Lo importante sobre las coincidencias es que, incluso si se producen una vez, es mucho menos probable que se produzcan dos veces. E incluso menos probable que se produzcan tres veces. Tomando moléculas proteicas más y más separadas, podemos eliminar casi la coincidencia.

Por ejemplo, en un estudio de un grupo de biólogos de Nueva Zelanda, se clasificaron 11 animales, cinco veces por separado, utilizando cinco moléculas diferentes de proteínas. Los 11 animales eran la oveja, el mono rhesus, el caballo, el canguro, la rata, el conejo, el perro, el cerdo, el hombre, la vaca y el chimpancé. La idea era tratar de encontrar, en primer lugar, un árbol de relación entre los 11 animales, utilizando una proteína. Luego ver si se obtiene el mismo árbol relacional utilizando una proteína diferente. Por último, hacer lo mismo con una tercera, cuarta y quinta proteínas. En teoría, si por ejemplo la evolución no fuese cierta, sería posible que cada una de las cinco proteínas diese un árbol «relacional» completamente diferente.

Las cinco secuencias proteicas estaban disponibles para los 11 animales y se encontraron en la biblioteca. Hay 654 729 075 árboles relacionales posibles a considerar, por lo que tuvieron que emplearse los métodos de simplificación habituales. El ordenador imprimió el árbol más económico, para cada una de las cinco proteínas. Ello nos proporciona cinco opiniones independientes, en relación con el verdadero árbol entre estos 11 animales. El resultado más claro que podríamos esperar es que las cinco estimaciones resultasen ser idénticas. La probabilidad de obtener este resultado por pura suerte es muy pequeña: el número tiene 31 ceros detrás de la coma decimal. No deberíamos sorprendernos si no obtenemos un resultado tan perfecto como éste: sólo hay que esperar que se produzca una cierta cantidad de evolución convergente y de coincidencia. Pero deberíamos preocuparnos si no hubiese un cierto acuerdo sustancial entre los diferentes árboles. De hecho, los cinco árboles no resultaron completamente idénticos, pero sí bastante similares. Las cinco moléculas están de acuerdo en situar al hombre, al chimpancé y al mono cercanos entre sí, pero hay algunos desacuerdos sobre qué animal es el siguiente que está más cerca de este grupo: la hemoglobina B revela que es el perro; el fibrinopéptido B revela que es la rata; el fibrinopéptido A dice que es un grupo formado por la rata y el conejo; la hemoglobina A revela que es un grupo constituido por la rata, el conejo y el perro.

Tenemos un antepasado común con el perro, y otro con la

rata. Estos dos antepasados existieron realmente, en un momento determinado de la historia. Uno de ellos tiene que ser más reciente que el otro, de forma que la hemoglobina B o el fibrinopéptido B tienen que estar equivocados en su estimación de las relaciones evolutivas. Como ya he dicho, no necesitamos preocuparnos de estas pequeñas discrepancias. Esperamos una cierta cantidad de convergencia y coincidencias. Si estamos verdaderamente más cerca del perro, significa que nosotros y la rata hemos convergido uno con otro con respecto a nuestro fibrinopéptido B. Si estamos verdaderamente más cerca de la rata, significa que nosotros y el perro hemos convergido uno con otro con respecto a nuestra hemoglobina B. Podemos hacernos una idea de qué situación es más probable mirando otras moléculas. Pero no continuaré con este tema: ya he hecho hincapié en este punto.

Dije que la taxonomía era uno de los campos biológicos con peor genio, y uno de los más rencorosos. Stephen Gould la ha caracterizado bien con la frase «nombres y malicia». Los taxonomistas parecen sentir con pasión sus escuelas de pensamiento, de una forma que esperaríamos en ciencias políticas o en economía, pero no en una ciencia académica. Está claro que los miembros de una escuela determinada de taxonomía piensan de sí mismos que son una comunidad de hermanos acosada, como los primeros cristianos. Me di cuenta de ello cuando un conocido taxonomista me dio, pálido y consternado, la «noticia» de que Fulano de tal (el nombre no importa) se había «*cambiado* a los cladistas».

La siguiente revisión breve de las escuelas de pensamiento taxonómico es probable que moleste a algunos de sus miembros, pero no más de lo que ellos se enfurecen habitualmente entre sí, de forma que no haré más daño. En términos de su filosofía fundamental, los taxonomistas caen principalmente dentro de dos campos. Por una parte, están aquellos que no se andan con rodeos sobre el hecho de que su finalidad es descubrir las relaciones evolutivas. Para ellos (y para mí) un buen árbol taxonómico es un árbol genealógico de relaciones evolutivas. Cuando hacen taxonomía, utilizan todos los métodos a su alcance para dar la mejor opinión posible sobre la cercanía del parentesco de los animales entre sí. Es difícil encontrar un nombre para estos taxonomistas, porque el nombre obvio, «taxonomistas evolutivos», ha sido usurpado por una subescuela determinada. A veces, se les llama «filetistas». He escrito este capítulo, hasta ahora, desde un punto de vista filetista.

Pero hay muchos taxonomistas que actúan de manera diferente, por razones bastante manifiestas. Aunque es probable que

estén de acuerdo en que uno de los últimos fines de la taxonomía es el de realizar descubrimientos sobre las relaciones evolutivas, insisten en mantener la *práctica* de la taxonomía separada de la teoría –presumiblemente de la teoría evolutiva–, o sea, de lo que ha conducido a establecer el patrón de semejanzas. Estos taxonomistas estudian patrones de semejanzas por sí mismos. No hacen juicios previos sobre si el patrón de semejanza está producido por la historia evolutiva y si se debe al estrecho parentesco. Prefieren construir su taxonomía utilizando sólo el patrón de semejanzas.

Una ventaja es que, si se tienen dudas sobre la evolución, pueden utilizarse los patrones de semejanza para probarlo. Si la evolución es cierta, las semejanzas entre los animales deberían seguir ciertos patrones predictibles, notablemente el patrón de ensamblamiento jerárquico. Si la evolución es falsa, Dios sabe *qué* patrón podríamos esperar, pero no habría una razón obvia para esperar un patrón jerárquico ensamblado. Si se asume la evolución a través del *quehacer* de la propia taxonomía, insiste esta escuela, podrían utilizarse los resultados del propio trabajo taxonómico para apoyar la verdad sobre la evolución: el argumento sería circular. Este argumento tendría fuerza si alguien tuviese serias dudas sobre la verdad de la evolución. Una vez más, es difícil encontrar un nombre adecuado para esta segunda escuela de pensamiento entre los taxonomistas. Los llamaré los «observadores de semejanzas».

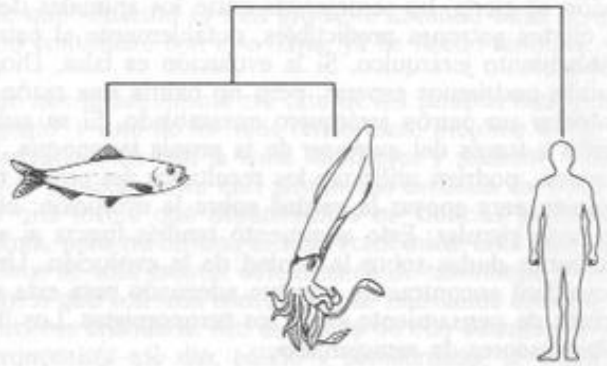
Los filetistas, los taxonomistas que tratan de descubrir las relaciones evolutivas, se dividen en dos escuelas de pensamiento. Los cladistas, que siguen los principios establecidos por Willi Hennig en su famoso libro *Phylogenetic Systematics* (Sistematización filogenética), y los taxonomistas evolutivos «tradicionales». Los cladistas están obsesionados con las ramificaciones. Para ellos, el fin de la taxonomía es descubrir el orden en el que se dividen las descendencias a lo largo de la evolución. No les importa lo mucho o poco que hayan cambiado estas descendencias desde el punto en el que se ramificaron. Los taxonomistas evolutivos «tradicionales» (*no* lo digo en sentido peyorativo) se diferencian de los cladistas principalmente en que no consideran sólo la evolución de tipo ramificado. También toman en cuenta todo el cambio que tiene lugar durante la evolución; no sólo las ramificaciones.

Los cladistas piensan en términos de árboles ramificados, desde el comienzo de su trabajo. Comienzan dibujando todos los árboles ramificados posibles para los animales con los que están tratando (sólo las bifurcaciones, porque ¡la paciencia tiene límites!). Como vimos cuando explicamos la taxonomía mole-

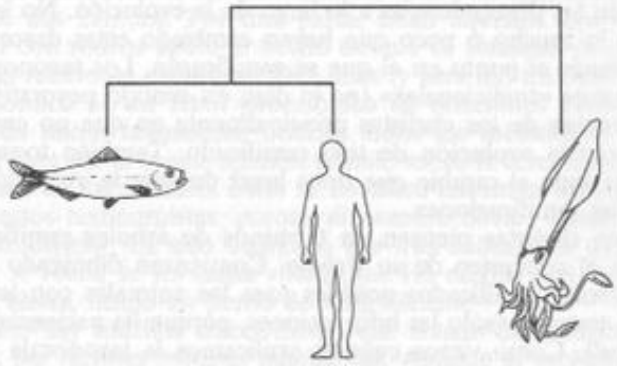
cular, la tarea se dificulta al tratar de clasificar muchos animales, porque el número de árboles posibles se hace astronómicamente grande. Pero como vimos también, por suerte hay atajos y aproximaciones útiles, lo que significa que esta clase de taxonomía puede hacerse en la práctica.

Si, en virtud del argumento, estuviéramos tratando de clasificar tres animales, el calamar, el arenque y el hombre, los tres únicos árboles posibles son los siguientes:

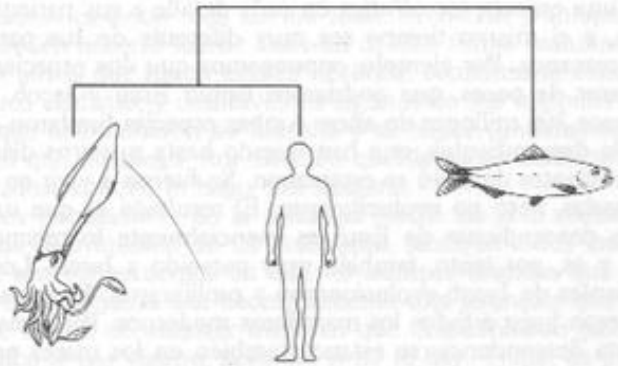
1. El calamar y el arenque están cerca uno de otro, el hombre es el «grupo ajeno».



2. El hombre y el arenque están cerca uno de otro, el calamar es el grupo ajeno.



3. El hombre y el calamar están cerca uno de otro, el arenque es el grupo ajeno.



Los cladistas mirarían por turno cada uno de los tres posibles árboles y escogerían el mejor. ¿Cómo se reconoce el mejor? Sería el árbol que une a los animales que tienen el mayor número de características comunes. Etiquetamos como «grupo ajeno» el animal que tiene el menor número de características en común con los otros dos. De los árboles descritos anteriormente, el segundo sería el preferido, porque el hombre y el arenque tienen muchas más características en común que el calamar y el arenque o el calamar y el hombre. El calamar es el grupo ajeno porque no tiene muchas características en común con el hombre o el arenque.

Actualmente, no es tan simple como el contar características en común, porque algunos tipos de características son ignorados deliberadamente. Los cladistas quieren dar un peso especial a las características que han evolucionado recientemente. Las características primitivas que han heredado todos los mamíferos del primero de la serie, por ejemplo, no tienen utilidad para hacer clasificaciones dentro de los mamíferos. Los métodos que utilizan para decidir qué características son antiguas son interesantes, pero explicarlos nos apartaría del objetivo de este libro. La cuestión principal a recordar en este estadio es que, al menos en principio, los cladistas piensan en todos los árboles bifurcados posibles que *podrían* unir el conjunto de animales con los que están tratando, y tratan de escoger el árbol correcto. Y el verdadero cladista no se anda con rodeos sobre el hecho de que él piensa que los árboles ramificados o «cladogramas» son árbo-

les genealógicos, que muestran la cercanía del parentesco evolutivo.

Si se lleva hasta un extremo, la obsesión única con la ramificación podría dar extraños resultados. Es teóricamente posible para una especie ser *idéntica* en cada detalle a sus parientes lejanos, y al mismo tiempo ser muy diferente de sus parientes más cercanos. Por ejemplo, supongamos que dos especies muy similares de peces, que podríamos llamar Esaú y Jacob, vivieron hace 300 millones de años. Ambas especies fundaron dinastías de descendientes, que han llegado hasta nuestros días. Los descendientes de Esaú se estancaron. Se fueron a vivir en aguas profundas, pero no evolucionaron. El resultado es que un moderno descendiente de Esaú es esencialmente lo mismo que Esaú y es, por tanto, también muy parecido a Jacob. Los descendientes de Jacob evolucionaron y proliferaron. Eventualmente, dieron lugar a todos los mamíferos modernos. Pero una línea de esta descendencia se estancó también en los mares profundos, y originó descendientes modernos. Estos son peces tan semejantes a los descendientes modernos de Esaú que es difícil distinguirlos.

¿Cómo deberíamos clasificar a estos animales? El taxonomista evolutivo tradicional reconocería la gran semejanza entre los descendientes primitivos de aguas profundas de Esaú y de Jacob, y los clasificaría juntos. El cladista estricto no podría hacerlo. Los descendientes de Jacob localizados en aguas profundas, aunque se parezcan a los descendientes de Esaú localizados también en aguas profundas, son, sin embargo, parientes más cercanos de los mamíferos. Su antepasado común vivió más recientemente, aunque sólo sea un poco más que su antepasado común con los descendientes de Esaú. Por tanto, deben clasificarse con los mamíferos. Puede parecer extraño, pero puedo tratarlo con ecuanimidad. Es, al menos, lógico y claro. Hay virtudes tanto en el cladismo como en la taxonomía evolutiva tradicional, y a mí no me importa mucho de qué manera clasifica los animales la gente, en tanto me digan cómo lo están haciendo.

Volviendo a la otra escuela principal de pensamiento, los observadores de semejanza se pueden clasificar en dos subescuelas. Ambas están de acuerdo en proscribir la evolución de sus pensamientos diarios mientras hacen taxonomía. Pero no coinciden en cómo proceder en su taxonomía diaria. Una de las subescuelas se denomina a veces «fenetistas», y otras, «taxonomistas numéricos». Yo los llamaré «calculadores de la distancia media». La otra escuela de observadores de semejanzas se hacen llamar «cladistas transformados». Es un mal nombre, ya que representa algo que *no* son. Cuando Julian Huxley introdujo el

término «clade» lo definió, sin ambigüedades, en términos de ramificaciones y antepasados evolutivos. Una clade en el conjunto de todos los organismos que descienden de un antepasado determinado. Ya que el principal punto de los «cladistas transformados» es evitar toda noción sobre evolución y antepasados, no pueden hacerse llamar cladistas de una forma manifiesta. La razón por la que hacen esto es histórica: comenzaron como verdaderos cladistas, y mantuvieron algunos de sus métodos mientras que abandonaron su filosofía y su lógica fundamental. Supongo que no tengo otra elección que llamarles cladistas transformados, aunque lo hago con desgana.

Los calculadores de la distancia media no sólo rechazan el uso de la evolución en su taxonomía (aunque todos creen en ella), son consecuentes en que no siempre asumen que el patrón de semejanza sea necesariamente una jerarquía que se bifurca. Tratan de emplear métodos que descubran un patrón jerárquico si hay alguno, pero no, si no lo hay. Tratan de preguntar a la naturaleza si está realmente organizada jerárquicamente. No es una tarea fácil, y justo es decir que no hay métodos disponibles para conseguir esta finalidad. Sin embargo, esta finalidad me parece que forma un todo con el saludable objetivo de evitar preconcepciones. Sus métodos son bastante sofisticados y matemáticos, y tan adecuados para clasificar cosas no vivientes, por ejemplo rocas o reliquias arqueológicas, como para clasificar organismos vivos.

Comienzan midiendo todas las cosas que pueden en sus animales. Hay que ser un poco inteligente para interpretar estas medidas, pero no entraré en ello. El resultado final es que todas se combinan, para producir un índice de semejanza (o, su opuesto, un índice de diferencia) entre dos animales. Si se desea, se pueden visualizar los animales como nubes de puntos en el espacio. Las ratas, ratones, conejillos de indias, etc., se encontrarían en una parte del espacio. Más lejos, habría otra pequeña nube, formada por leones, tigres, leopardos, etc. La distancia entre dos puntos cualesquiera en este espacio es una medida de cuánto se parecen los dos animales entre sí, cuando se combinan muchos de sus atributos. La distancia entre un león y un tigre es pequeña. Así es la distancia entre una rata y un ratón. Pero la distancia entre una rata y un tigre, o un ratón y un león es grande. La combinación de todos los atributos se hace normalmente con ayuda de un ordenador. El espacio en el que estos animales están situados es superficialmente como la Tierra de las Bioformas, pero las «distancias» reflejan semejanzas corporales, más que genéticas.

Después de haber calculado un índice medio de semejanza

(o de distancia) entre un animal y otro, el ordenador está programado para examinar a continuación el conjunto de distancias/semejanzas y para tratar de encajarlas dentro de un patrón de grupos jerárquicos. Hay mucha controversia sobre qué método debería utilizarse para buscar grupos. No hay un método correcto, y no todos dan la misma respuesta. Peor aún, es posible que algunos de estos métodos computerizados estén demasiado «deseosos» de «ver» grupos ordenados jerárquicamente dentro de otros grupos, incluso si no los hay. La escuela de-calculadores de distancias, o «taxonomistas numéricos», se ha quedado un poco fuera de moda. Mi punto de vista es que se trata de una fase temporal, como las modas, y que esta clase de «taxonomía numérica» no hay que darla por perdida fácilmente. Yo espero su vuelta.

La otra escuela de observadores de patrones puros la forman aquellos que se denominan cladistas transformados, por razones históricas, como hemos visto. Es de este grupo de donde emana la «malicia». No seguiré la práctica habitual de trazar sus orígenes históricos desde las filas de los verdaderos cladistas. En su filosofía fundamental, los llamados cladistas transformados tienen más en común con las otras escuelas de observadores de patrones puros, los llamados «fenetistas» o «taxonomistas numéricos», que acabo de tratar bajo el título de calculadores de la distancia media. Lo que comparten es una aversión a arrastrar la evolución dentro de la práctica de la taxonomía, aunque ello no se traduce *necesariamente* en una hostilidad hacia la idea de la propia evolución.

Los cladistas transformados comparten con los verdaderos muchos de sus métodos, en la práctica. Ambos grupos piensan, desde el mismo principio, en términos de árboles que se bifurcan, y recogen ciertos tipos de características taxonómicamente importantes, y otros sin valor. Se diferencian respecto al razonamiento que dan a esta discriminación. Como los calculadores de distancias medias, los cladistas transformados no trabajan para descubrir árboles genealógicos. Están buscando árboles de meras semejanzas. Están de acuerdo con los calculadores de distancias medias en dejar abierta la cuestión de si el patrón de semejanzas refleja la historia evolutiva o no. Pero, a diferencia de los calculadores de distancias medias, que, al menos en teoría, están preparados para dejar que la naturaleza les diga si está organizada de una manera jerárquica, los cladistas transformados *asumen* que sí lo está. Es un axioma, un artículo de fe para ellos, el hecho de que las cosas tienen que clasificarse en jerarquías ramificadas (o, de una manera equivalente, en ensamblajes ensamblados). Debido a que los árboles ramificados no tienen nada

que ver con la evolución, no tienen que aplicarse obligatoriamente a las cosas vivas. Los métodos de los cladistas transformados pueden utilizarse, de acuerdo con sus defensores, no sólo para clasificar animales y plantas sino también piedras, planetas, libros en una biblioteca, y vasijas de la Edad de Bronce. En otras palabras, no suscribirían el punto que planteé con mi comparación de la biblioteca, de que la evolución es la única base sólida para una clasificación singularmente jerárquica.

Los calculadores de distancias medias, como vimos, miden la distancia entre un animal y otro, en un ambiente en el cual «lejos» significa que «no se parece» y «cerca», que «se parece». Sólo entonces, después de calcular una especie de índice medio de semejanza, comienzan a tratar de interpretar sus resultados en términos de una jerarquía ramificada, un grupo dentro de una agrupación, o un diagrama en «árbol». Los cladistas transformados, sin embargo, como verdaderos cladistas que fueron en un momento dado, introducen los agrupamientos y el pensamiento ramificado desde un principio. Como los verdaderos cladistas, comenzarían dibujando todos los árboles bifurcados posibles y escogiendo el mejor.

Pero ¿qué están diciendo cuando consideran cada «árbol» posible, y qué quieren decir con el mejor? ¿A qué estado hipotético del mundo corresponde cada árbol? Para un cladista verdadero, un seguidor de W. Hennig, la respuesta está muy clara. Cada uno de los 15 árboles posibles que unen cuatro animales representa un árbol genealógico posible. De todos los 15 árboles genealógicos que pueden concebirse uniendo a los cuatro animales, uno y sólo uno debe ser correcto. La historia de los antepasados de los animales tuvo lugar. Hay 15 historias posibles, si tomamos como hipótesis el que todas las ramificaciones son bifurcaciones. Catorce de esas posibles historias deben ser erróneas. Sólo una puede ser correcta, puede corresponder a la forma en que realmente sucedió la historia. De entre todos los 135 135 árboles genealógicos posibles que culminan en 8 animales, 135 134 deben ser erróneos. Sólo uno representa la verdad histórica. Puede que no sea fácil estar seguro de *cuál* es el árbol correcto, pero el verdadero cladista puede estar seguro *de que* no hay más que uno.

Pero ¿a qué corresponden los 15 (o los 135 135, o los que sean) árboles posibles, y el árbol correcto, en el mundo no evolutivo de los cladistas transformados? La respuesta, como mi colega y anteriormente alumno Mark Ridley ha señalado, en su *Evolution and Clasification* (Evolución y clasificación) es irrelevante. El cladista transformado rehúsa permitir que el concepto de *antepasados* entre en sus consideraciones. Para él, «antepa-

sado» es una palabra fea. Pero, por otra parte, insiste en que la clasificación tiene que ser jerárquica y ramificada. Así pues, si los 15 (o 135 135) posibles árboles jerárquicos no son árboles con la historia de los antepasados, ¿qué son? No hay nada, excepto recurrir a las antiguas filosofías, en busca de alguna noción imprecisa, idealista, de que el mundo está organizado de una manera jerárquica; alguna noción de que todas las cosas en el mundo tienen su «opuesto», su místico *ying* o *yang*. Nunca se obtiene nada más concreto que esto. No es posible, en el mundo no evolutivo de los cladistas transformados, realizar afirmaciones contundentes y claras, como «sólo uno de los 645 árboles posibles que unen a 6 animales puede ser correcto; los restantes no lo deben ser».

¿Por qué la palabra antepasado es una palabra fea para los cladistas? No es (espero) que piensen que no hubo nunca ningún antepasado. Es que ellos han decidido que los antepasados no tienen sitio en la taxonomía. Es una posición defendible en lo que se refiere a la *práctica* diaria de la taxonomía. Ningún cladista dibuja antepasados de carne y hueso sobre los árboles genealógicos, aunque los taxonomistas evolutivos tradicionales lo hagan algunas veces. Los cladistas, de todos los colores, tratan todas las relaciones entre los animales reales, observados como *parientes*, como una cuestión de forma. Esto es razonable. Lo que no lo es, es que se convierta en un tabú el *concepto* de antepasados, contra la utilización del lenguaje de las descendencias que facilitan la justificación fundamental para adoptar el árbol jerárquicamente ramificado como base de su taxonomía.

He dejado hasta el final el aspecto más extraño de la transformada escuela cladista de taxonomía. No contentos con una creencia perfectamente razonable, de que hay algo que manifestar para excluir las hipótesis evolutiva y ancestral de la *práctica* de la taxonomía, creencia que comparten con los «fenetistas» o «calculadores de distancias», algunos cladistas transformados han ido directamente al asalto y han concluido que debe de haber algo erróneo con la propia evolución. El hecho es demasiado grotesco para darle crédito, pero algunos de los principales «cladistas transformados» profesan una hostilidad real hacia la idea de la propia evolución, especialmente hacia la teoría de la evolución darwinista. Dos de ellos, G. Nelson y N. Platnick, del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York, han llegado al extremo de escribir que «el darwinismo... es, en resumen, una teoría que ha sido puesta a prueba y se ha encontrado que es falsa». Me gustaría saber en qué consiste esta «prueba»; incluso más, me gustaría saber con qué teoría alternativa

Nelson y Platnick explicarían los fenómenos que explica el darwinismo, especialmente la adaptación de la complejidad.

No es que cualquier cladista transformado sea, él mismo, un creacionista fundamentalista. Mi propia interpretación es que se complacen en una idea exagerada de la importancia de la taxonomía en biología. Han decidido, quizá correctamente, que pueden hacer mejor taxonomía si se olvidan de la evolución, y si no utilizan nunca el concepto de antepasado al pensar en taxonomía. De la misma forma, un estudiante, por ejemplo, de la célula nerviosa, podría decir que a él no le ayuda pensar en la evolución. El especialista en nervios está de acuerdo en que sus células nerviosas son producto de la evolución, pero no necesita utilizar este hecho para sus investigaciones. Necesita saber mucho sobre física y química, pero cree que el darwinismo es irrelevante para sus investigaciones diarias sobre los impulsos nerviosos. Ésta es una posición defendible. Pero no se puede decir que, por el hecho de que no sea necesaria una teoría determinada en la práctica diaria de una rama científica determinada, pueda concluirse que la teoría es *falsa*. Sólo podría decirse si se tuviese una sobreestimación grandiosa de la importancia de la rama científica.

Así y todo, no sería lógico. Un físico no necesita el darwinismo para practicar la física. Podría pensar que la biología es un tema trivial, comparado con la física. De aquí se deduciría que, en su opinión, el darwinismo tiene una importancia trivial para la ciencia. Pero no podría concluir a partir de esto, que ¡es *falso*! Y esto es esencialmente lo que parece que han hecho algunos de los líderes de la escuela de cladistas transformados. «Falso», nótese bien, es precisamente la palabra utilizada por Nelson y Platnick. No es necesario decir que sus palabras han sido recogidas por los sensibles micrófonos que mencioné en el capítulo anterior, y el resultado ha sido una publicidad considerable. Se han ganado una plaza de honor en la literatura creacionista fundamentalista. Cuando hace poco un importante cladista transformado vino invitado a dar una conferencia en mi universidad, atrajo una muchedumbre mayor que cualquier otro conferenciante invitado en ese año. No es difícil ver el porqué.

No hay duda de que todas estas afirmaciones, como que «el darwinismo... es una teoría que ha sido puesta a prueba y se ha encontrado que es falsa», viniendo de biólogos con experiencia de la plantilla de un museo nacional respetable, serán un gran placer para los creacionistas, y otros que tienen un interés activo en perpetrar falsedades. Ésta es la única razón por la que he distraído a mis lectores con el tema del cladismo transformado. Como dijo Mark Ridley, de una manera más suave, en una re-

visión del libro en el que Nelson y Platnick hicieron esta afirmación, de que el darwinismo es falso: «¿Quién habría pensado que todo lo que querían decir era que las especies ancestrales son difíciles de representar en las clasificaciones cladísticas?» Por supuesto que es difícil atribuir la identidad exacta de los antepasados, y es una buena razón para tratar de no hacerlo. Pero hacer afirmaciones que animan a otros a concluir que nunca hubo antepasados es corromper el lenguaje y traicionar a la verdad.

Y ahora, mejor salgo fuera y me pongo a cavar en el jardín, o hago alguna otra cosa.

11. RIVALES PREDESTINADOS

Ningún biólogo serio duda que la evolución ha tenido lugar, ni tampoco que todas las criaturas vivientes están emparentadas entre sí. Sin embargo, algunos han tenido serias dudas sobre la peculiar teoría de Darwin, de *cómo* tuvo lugar la evolución. Algunas veces, resulta ser sólo un argumento dialéctico. La teoría de la evolución puntualizada, por ejemplo, puede ser presentada como antidarwinista. Sin embargo, como dejé establecido en el capítulo 9, constituye una variante menor del darwinismo, y no debería figurar en ningún capítulo sobre teorías rivales. Pero hay otras teorías que *no* son versiones del darwinismo, que van claramente en contra del mismo espíritu del darwinismo. Éstas teorías rivales son las que constituyen el tema de este capítulo. Incluyen varias versiones de lo que se denomina lamarckismo, y otros puntos de vista como el «neutralismo», el «mutacionismo» y el «creacionismo» propuestos, de vez en cuando, como alternativas a la selección darwinista.

La manera obvia de decidir entre las teorías rivales es examinar la evidencia. Las teorías de tipo lamarckiano, por ejemplo, son tradicionalmente rechazadas —correctamente rechazadas— por falta de una buena evidencia para las mismas (no por falta de enérgicos intentos, en algún caso por partidarios entusiastas preparados para falsificar la evidencia). En este capítulo, tomaré un rumbo diferente, debido en gran parte a que hay muchos otros libros que han examinado la evidencia y llegado a una conclusión en favor del darwinismo. En lugar de examinar la evidencia en favor y en contra de las teorías rivales, adoptaré un enfoque más imaginativo. Mi argumento será que el darwinismo es la única teoría conocida *capaz* de explicar, en principio, ciertos aspectos de la vida. Si estoy en lo cierto, significaría que, incluso si no hubiese una evidencia real en favor de la teo-

ría darwinista (la hay, por supuesto), estaríamos justificados al preferirla sobre todas las demás teorías rivales.

Una forma de dramatizar este punto es hacer una predicción. Predigo que, si alguna vez se descubre una forma de vida en alguna otra parte del universo, no importa lo extravagante y misteriosamente diferente que pueda ser en sus detalles, se encontrará que se parece a la vida sobre la Tierra en un aspecto fundamental: habrá evolucionado mediante algún tipo de selección natural de tipo darwinista. Claro que es probable que en toda nuestra vida no seamos capaces de demostrarla, pero sigue siendo una forma de evidenciar una verdad importante sobre la vida en nuestro propio planeta. La teoría darwinista es capaz de explicar la vida. Ninguna otra teoría de las sugeridas es, en principio, capaz de explicar el fenómeno de la vida. Lo demostraré exponiendo todas las teorías rivales, no la evidencia en favor o en contra de ellas, sino su suficiencia, en principio, como explicaciones de la vida.

Primero, debo especificar qué significa «explicar» la vida. Hay, por supuesto, muchas propiedades de las cosas vivas que podríamos enumerar, y algunas de ellas podrían ser explicadas por las teorías rivales. Muchos hechos sobre la distribución de las moléculas de proteínas, como hemos visto, pueden deberse a mutaciones genéticas neutras, más que a la selección darwinista. Hay una propiedad particular de las cosas vivas, sin embargo, que quiero separar como explicable *sólo* por la selección darwinista. Es lo que ha constituido el tópico reiterativo de este libro: la adaptación de la complejidad. Los organismos vivos están bien preparados para sobrevivir y reproducirse en su medio ambiente, de maneras demasiado numerosas e improbables desde un punto de vista estadístico como para haberse desarrollado en un solo golpe de azar. Siguiendo a Paley, he utilizado el ejemplo del ojo. Dos o tres características de un ojo «bien diseñado» podrían haberse desarrollado en un solo accidente fortuito. Es el número de partes entrelazadas, todas bien adaptadas para la visión y bien adaptadas entre sí, lo que exige un tipo de explicación especial, más allá de la pura casualidad. La explicación darwinista, por supuesto, implica también al azar, en forma de mutaciones. Pero el azar es filtrado de una forma cumulativa mediante una selección, paso a paso, a lo largo de muchas generaciones. Otros capítulos han demostrado que esta teoría es capaz de facilitar una explicación satisfactoria sobre la adaptación de la complejidad. En este capítulo trataré el hecho de que las demás teorías no son capaces de hacerlo.

Consideremos, en primer lugar, el rival histórico más prominente del darwinismo: el lamarckismo. Cuando se propuso por

vez primera, a comienzos del siglo XIX, no era un rival del darwinismo, porque éste no existía. El Caballero de Lamarck iba por delante de su tiempo. Era uno de aquellos intelectuales del siglo XVIII que argüían en favor de la evolución. En esto tenía razón, y merecería ser reconocido sólo por esto junto con Erasmus, el abuelo de Charles Darwin, y otros. Lamarck ofreció también la mejor teoría sobre el mecanismo de la evolución a la que alguien pudiera haber llegado en aquel tiempo, pero no hay ninguna razón para suponer que, si la teoría del mecanismo darwinista hubiese estado presente entonces, él la hubiera rechazado. No lo estaba, y ha sido para desgracia de Lamarck el que, por lo menos en el mundo de habla inglesa, su nombre se haya convertido en sinónimo de un error —su teoría sobre el *mecanismo* de la evolución— más que de su creencia correcta en el *hecho* de que la evolución tuvo lugar. Éste no es un libro de historia, y no voy a intentar hacer una exposición erudita de qué fue lo que dijo exactamente el propio Lamarck. Había cierta dosis de misticismo en sus palabras; por ejemplo, sostenía la idea de que el progreso ascendente era, lo que mucha gente aún hoy en día imagina, como la escalera de la vida; y hablaba de los animales porfiando, como si ellos, en cierto sentido, *quisieran* evolucionar conscientemente. Extraeré del lamarckismo aquellos elementos no místicos que, por lo menos a primera vista, parecen tener una posibilidad deportiva de ofrecer una alternativa real al darwinismo. Estos elementos, los únicos adoptados por los «neolamarckistas» modernos, son básicamente dos: la herencia de características adquiridas y el principio del uso y del desuso.

El principio del uso y del desuso afirma que aquellas partes de un organismo que se utilizan son las que más se desarrollan. Las partes que no se utilizan tienden a desaparecer. Es un hecho observado que cuando se ejercita un músculo determinado éste crece; los músculos que no se utilizan nunca disminuyen de tamaño. Examinando el cuerpo de un hombre, podemos decir qué músculos utiliza y cuáles no. Podemos incluso adivinar su profesión o su forma de recreo. Los entusiastas del culto al «desarrollo corporal» utilizan el principio del uso y desuso para «desarrollar» sus cuerpos, casi como una pieza de escultura, cualquiera sea la forma poco natural que demande la moda dentro de esta peculiar minoría cultural. Los músculos no son las únicas partes del cuerpo que responden a la utilización de esta clase de camino. Si se camina descalzo, se adquiere una piel más gruesa en las plantas de los pies. Es fácil distinguir a un granjero de un empleado de banca, simplemente mirando sus manos. Las manos de un granjero son callosas, endurecidas por la larga ex-

posición al duro trabajo. Si las manos del empleado de banca tienen alguno, se limitaría sólo a un pequeño callo en el dedo que utiliza para escribir.

El principio del uso y del desuso capacita a los animales para mejorar en la tarea de sobrevivir, en su mundo, de una manera progresiva, durante su existencia, como resultado de vivir en ese mundo. Los hombres, mediante la exposición directa a la luz del sol, o la falta de la misma, desarrollan un color en la piel que les equipa mejor para sobrevivir en unas condiciones locales determinadas. Demasiado sol es peligroso. Los bañistas que toman el sol con entusiasmo, y tienen una piel pálida, son susceptibles de desarrollar un cáncer de piel. Demasiado poco sol, por otra parte, conduce a una deficiencia de vitamina D y al desarrollo de un raquitismo, que se observa a veces en niños negros que viven en Escandinavia. El pigmento oscuro melanina, que se sintetiza bajo la influencia del sol, constituye una pantalla que protege a los tejidos subyacentes de los efectos dañinos del exceso de luz solar. Si una persona bronceada se traslada a un clima menos soleado, la melanina desaparece, y el cuerpo es capaz de beneficiarse de la poca cantidad de sol que hay. Esto puede presentarse como un ejemplo del principio del uso y desuso: la piel se broncea cuando se usa, y palidece cuando no se usa. Algunas razas tropicales, por supuesto, heredan una gruesa pantalla de melanina, estén o no expuestos a la luz del sol como individuos.

Volvamos al otro principio lamarckiano básico, la idea de que estas características adquiridas son heredadas por las futuras generaciones. Toda la evidencia sugiere que esta idea es falsa pero, a través de la mayor parte de la historia, se ha creído que era verdad. Lamarck no la inventó, sino que se limitó a incorporar la sabiduría popular de su tiempo. En algunos círculos todavía lo creen. Mi madre tenía un perro que padeció una cojera, mantenía elevada una de las patas traseras y renqueaba sobre las otras tres. Una vecina tenía un perro más viejo que había perdido una pata en un accidente de tráfico. Ella estaba convencida de que su perro debía de ser el padre del perro de mi madre, ya que, obviamente, había heredado su cojera. La sabiduría popular y los cuentos fantásticos están llenos de leyendas similares. Mucha gente cree, o le gustaría creer, en la herencia de las características adquiridas. Hasta este siglo era también la teoría dominante de la herencia entre biólogos serios. El propio Darwin creía en ella, pero no formó parte de su teoría de la evolución, de forma que su nombre no está unido a ella en nuestras mentes.

Si se pone la herencia de las características junto con el principio del uso y desuso, se tiene lo que parece una buena receta para una mejora evolutiva. Habitualmente se la denomina teoría lamarckiana de la evolución. Si varias generaciones sucesivas endurecen sus pies caminando descalzos sobre el árido suelo, cada generación, según esta teoría, tendrá una piel más dura que la anterior. Cada generación tendrá una ventaja sobre su predecesora. Al final, los niños nacerán con los pies ya endurecidos (de hecho, es así, aunque por diferentes razones como veremos). Si varias generaciones sucesivas toman el sol en el trópico, se broncearán más y más ya que, de acuerdo con la teoría lamarckista, cada generación heredará algo del bronceado de la generación anterior. Con el tiempo, nacerán negros (de nuevo, como lo hacen de hecho, aunque no por las razones lamarckianas).

Los ejemplos legendarios son los brazos del herrero y el cuello de la jirafa. En los pueblos donde el herrero hereda el oficio de su padre, su abuelo y su bisabuelo, se pensaba que heredaba también unos músculos bien desarrollados. No sólo los heredaba sino que los desarrollaba más con el ejercicio, y pasaba estas mejoras a su hijo. Los antepasados de las jirafas, con cuellos cortos, necesitaban alcanzar las hojas altas de los árboles. Lucharon mucho tirando hacia arriba, estirando, así, los músculos y huesos del cuello. Cada generación terminó con un cuello un poco más largo que su predecesora, y pasó esta mejora al comienzo de la siguiente generación. Todos los avances evolutivos, de acuerdo con la teoría lamarckiana pura, siguen este patrón. El animal lucha por algo que necesita. Como resultado, las partes del cuerpo utilizadas en la lucha se desarrollan, o cambian en un sentido apropiado. Los cambios son heredados por la siguiente generación, y así continúa el proceso. Esta teoría tiene la ventaja de que es acumulativa; un ingrediente esencial de cualquier teoría de la evolución, si ésta tiene que cumplir su papel dentro de nuestra visión del mundo, como hemos visto.

La teoría lamarckiana parece tener un gran atractivo emocional, para ciertos tipos de intelectuales y personas profanas en la materia. Una vez, se me acercó un colega, famoso historiador marxista, un hombre culto y estudioso. Comprendía, me dijo, que todos los hechos parecían estar en contra de la teoría de Lamarck, pero ¿no había, realmente, ninguna esperanza de que pudiese ser verdad? Le dije que, en mi opinión, no había ninguna, y lo aceptó con un pesar sincero, diciéndome que, por razones ideológicas, le hubiera gustado que el lamarckismo hubiese resultado cierto. Parecía ofrecer una esperanza tan positiva para mejorar la humanidad. George Bernard Shaw dedicó uno de sus enormes Prefacios (en *Back to Methuselah*: De vuelta a Methuselah) a una apasionada defensa de la herencia de las ca-

racterísticas adquiridas. Su caso no estaba basado en los conocimientos biológicos, de los que él admitía de buena gana que no tenía ninguno, sino en una aversión emocional hacia las implicaciones del darwinismo, ese «capítulo de accidentes»:

> parece simple, porque al principio uno no se da cuenta de lo que implica. Pero cuando se empieza a comprender todo su significado, el corazón se hunde en un montón de arena. Hay un horrible fatalismo en ello, una reducción atroz y detestable de la belleza y la inteligencia, de la fuerza y el propósito, del honor y las aspiraciones.

Arthur Koestler fue otro distinguido hombre de letras que no podía tolerar lo que vio como implicaciones del darwinismo. Como dijo Stephen Gould, irónica pero correctamente, a través de sus últimos seis libros Koestler condujo «una campaña contra su propia comprensión errónea del darwinismo». Buscó refugio en una alternativa que para mí nunca estuvo clara, pero que puede interpretarse como una oscura versión del lamarckismo.

Koestler y Shaw eran individualistas que pensaban para sí mismos. Sus excéntricos puntos de vista sobre la evolución no han tenido, probablemente, mucha influencia aunque recuerdo, para mi vergüenza, que mi propia apreciación del darwinismo como adolescente se retrasó un año al menos por la retórica fascinante de la lectura de la obra de Shaw *De vuelta a Methuselah*. El atractivo emocional del lamarckismo, y la hostilidad emocional concurrente hacia el darwinismo, ha tenido, a veces, un impacto más siniestro, a través de las ideologías poderosas utilizadas como sustituto del pensamiento. T. D. Lysenko era un cultivador de plantas de segunda fila, sin otra distinción que la conseguida en el campo de la política. Su fanatismo antimendeliano, y su creencia ferviente y dogmática en la herencia de las características adquiridas, habrían sido ignoradas en la mayoría de los países civilizados. Por desgracia, vivía en un país donde la ideología importaba más que la verdad científica. En 1940 lo nombraron director del Instituto de Genética de la Unión Soviética, y alcanzó una gran influencia. Sus ignorantes puntos de vista sobre genética llegaron a ser los únicos cuya enseñanza se permitió en las escuelas soviéticas durante una generación. A la agricultura se le hizo un daño incalculable. Muchos genetistas soviéticos famosos fueron prohibidos, enviados al exilio o encarcelados. Por ejemplo, N. I. Vavilov, un genetista de reputación mundial, murió de desnutrición en una celda sin ventanas, después de un largo juicio ridículamente forjado sobre cargos tales como «espiar para los ingleses».

No es posible probar que las características adquiridas no se hereden. Por la misma razón, no podemos probar que no existen las hadas. Todo lo que podemos decir es que nunca se ha confirmado que se hayan visto hadas, y que las fotografías que se han hecho de ellas son falsificaciones palpables. Lo mismo es cierto de las supuestas huellas humanas encontradas en el estrato de los dinosaurios en Texas. Cualquier afirmación categórica que yo haga en el sentido de que las hadas no existen es vulnerable a la posibilidad de que, un día, pueda ver una diminuta persona con alas finísimas en el fondo de mi jardín. El estado de la teoría de la herencia de las características adquiridas es similar. Casi todos los intentos para demostrar estos efectos han fracasado. De los que han tenido un éxito aparente, algunos han resultado ser falsificaciones; por ejemplo, la famosa inyección subcutánea de tinta china en el sapo partero, descrita por Arthur Koestler en su libro. El resto han fallado ante su puesta a prueba por parte de otros investigadores. Sin embargo, de la misma manera que alguien podría ver un día un duende al fondo del jardín estando sobrio y con una cámara en la mano, alguien podría llegar a probar que las características adquiridas se pueden heredar.

Sin embargo, hay algo más que decir. Algunas cosas que no han sido observadas nunca de manera fiable son creíbles en tanto no pongan en duda alguna otra cosa más que conocemos. Por mi parte, no he visto ninguna buena prueba de que los plesiosaurios vivan hoy día en el lago Ness, pero mi visión del mundo no se vendría abajo si se encontrase uno. Simplemente, me sentiría sorprendido (y encantado), ya que no se conoce la existencia de fósiles de plesiosaurios en los últimos sesenta millones de años, y esto parece demasiado tiempo para que sobreviva una pequeña población vestigial. Pero ningún principio científico importante está en duda. Es una cuestión de hechos. Por otra parte, la ciencia ha amasado una buena comprensión de cómo funciona el universo, una comprensión que funciona bien para un amplio rango de fenómenos, y ciertas suposiciones serían incompatibles o, por lo menos, difíciles de reconciliar, con esta comprensión. Por ejemplo, esto es cierto sobre la afirmación, hecha a veces sobre una base bíblica falsa, de que el universo fue creado hace sólo unos 6 000 años. Esta teoría no sólo es falsa sino que es incompatible con la biología y la geología ortodoxas, con la teoría física de la radiactividad y con la cosmología (los cuerpos celestes situados a una distancia mayor de 6 000 años luz no serían visibles, si no existiera algo con una antigüedad de más de 6 000 años; la Vía Láctea no se detectaría, ni tampoco ninguno de los otros 100 000 millones de galaxias, cuya existencia reconoce la moderna cosmología).

Ha habido momentos en la historia de la ciencia en los que toda una ciencia ortodoxa ha sido desechada a causa de un sólo hecho desproporcionado. Sería arrogante afirmar que tales hechos no vuelvan a ocurrir. Pero nosotros, de una forma natural y acertada, pedimos unos estándares de autenticidad más elevados, antes de aceptar un hecho que pondría patas arriba una estructura científica desarrollada, que antes de aceptar un hecho que, aunque sorprendente, se acomoda fácilmente a las ideas científicas existentes. Para confirmar la existencia de un plesiosaurio en el lago Ness, aceptaría la evidencia de mis propios ojos. Si viese a un hombre levitando, antes de rechazar toda la física, sospecharía que soy víctima de una alucinación o de un conjuro. Existe un espectro continuo, desde las teorías que probablemente no son verdad, pero que podrían serlo, hasta las teorías que sólo podrían ser verdad a costa de echar abajo grandes estructuras de ciencia ortodoxa desarrollada.

Ahora bien, ¿dónde encaja el lamarckismo dentro de este espectro continuo? Está normalmente presente en el extremo del «no es cierto pero podría serlo». Quiero demostrar la tesis de que, aunque no está en la misma clasificación que la levitación debida al poder de la plegaria, el lamarckismo, o más específicamente la herencia de las características adquiridas, está más cerca del extremo de la «levitación» en el espectro continuo que del extremo del «monstruo del lago Ness». La herencia de las características adquiridas no es una de esas cosas que podrían ser verdad pero que probablemente no lo son. Discutiré que sólo podría ser verdad si se eliminase uno de los principios de embriología más apreciados y con mayor éxito. El lamarckismo, por tanto, necesita estar sujeto a un nivel mayor de escepticismo que el habitual en «el monstruo del lago Ness». ¿Cuál es, entonces, el principio embriológico que habría que eliminar antes de poder aceptar el lamarckismo? Voy a tener que explicarlo un poco. La explicación parecerá una divagación, pero se aclarará su importancia. Y recuérdese que todo esto es antes de empezar con el argumento de que el lamarckismo, aunque fuese cierto, sería todavía incapaz de explicar la evolución de la adaptación de la complejidad.

El campo de discusión es, entonces, la embriología. Tradicionalmente, ha existido una profunda división entre dos actitudes diferentes en cuanto a la manera en la que una sola célula se transforma en una criatura adulta. Su denominación oficial es la de preformacionistas y epigénesis, pero en sus versiones modernas las llamaré la teoría de las copias y la teoría de la receta. Los primeros preformacionistas creían que el cuerpo adulto estaba *preformado* dentro de la célula, a partir de la cual se

desarrollaba. Uno de ellos se imaginó que podía ver en su microscopio a un hombre en miniatura –un «homunculus»– hecho un ovillo dentro de un espermatozoide (¡no en el huevo!). El desarrollo embrionario, para él, era sencillamente un proceso de crecimiento. Todas las partes del cuerpo adulto estaban ya allí, preformadas. Cada homunculus masculino tendría sus propios espermatozoos ultraminiatura, en los que estarían sus propios hijos hechos unos ovillos, conteniendo cada uno de ellos a sus nietos hechos también unos ovillos... Aparte este problema de la regresión infinita, el preformacionismo inocente ignora que era mucho menos obvio en el siglo XVII que ahora, el hecho de que los hijos heredan atributos de la madre y del padre. Para ser justos, hubo otros preformacionistas llamados ovistas, bastante más numerosos que los «espermistas», que creían que el ser adulto estaba preformado en el huevo en lugar del espermatozoide. Pero el ovismo sufre los mismos problemas que el espermismo.

El preformacionismo moderno no sufre estos dos problemas pero aun así es erróneo. El preformacionismo moderno –la teoría de las copias– mantiene que el DNA del huevo fertilizado es equivalente a una copia del cuerpo adulto. Una copia es una miniatura a escala del objeto real. El objeto real –la casa, el coche, o lo que sea– es un objeto tridimensional, mientras que una copia es bidimensional. Se puede representar un objeto tridimensional como un edificio mediante un conjunto de planos bidimensionales: un plano de cada piso, varias proyecciones de la elevación, etc. Esta reducción en dimensiones es cuestión de conveniencia. Los arquitectos podrían facilitar a los constructores modelos tridimensionales de los edificios hechos a escala con cerillas y madera de balsa, aunque el conjunto de modelos bidimensionales hechos en papel –las copias– son más fáciles de transportar, de corregir y más de trabajar con ellas.

Es necesaria una reducción adicional a *una* dimensión, si se van a almacenar las copias en un ordenador con un código de pulsaciones y se van a transmitir, por ejemplo, por línea telefónica a otra parte del país. Esto se hace fácilmente volviendo a codificar cada copia bidimensional como un «registro» unidimensional. Las imágenes de televisión son codificadas para su transmisión por las ondas. De nuevo, la compresión dimensional es un mecanismo de codificación esencialmente trivial. Lo importante es que hay todavía una correspondencia, punto por punto, entre la copia y el edificio. Cada trozo de copia se corresponde con un trozo equivalente de edificio. En cierto sentido, la copia es un edificio «preformado» en miniatura, aunque la miniatura puede ser registrada en menos dimensiones de las que tiene el edificio.

La razón de mencionar la reducción de las copias a una sola dimensión estriba en que el DNA es un código unidimensional. Y así como es teóricamente posible transmitir un modelo a escala de un edificio a través de una línea telefónica unidimensional –un conjunto digitalizado de copias– así también es posible transmitir un cuerpo a escala a través de un código digital de DNA unidimensional. Esto no ocurre por casualidad pero, si así fuera, sería justo decir que la moderna biología molecular ha reivindicado la vieja teoría del preformacionismo. Consideremos la otra gran teoría embriológica, la teoría epigenética, o teoría de la receta o «del libro de cocina».

Una receta de un libro de cocina no es, en modo alguno, una copia del pastel que sale al final del horno. No es porque la receta sea una hilera unidimensional de palabras, mientras que el pastel es un objeto tridimensional. Como hemos visto, es perfectamente posible, mediante un proceso de registro, convertir un modelo a escala en un código unidimensional. Pero una receta no es un modelo a escala, ni una descripción de un pastel ya acabado, ni tampoco una representación punto por punto. Es un conjunto de *instrucciones* que, si se siguen con un orden correcto, darán como resultado un pastel. Una verdadera copia de un pastel codificada en una sola dimensión consistiría en una serie de registros a través del pastel, como si se pasase una aguja a través del mismo con una secuencia ordenada a lo largo y alto del pastel. Con intervalos milimétricos, se registrarían con un código las cercanías inmediatas de la punta de la aguja; por ejemplo, podrían obtenerse las coordenadas exactas de cada pasa y de cada miga, a partir de los datos seriados. Habría una planimetría exacta punto por punto entre cada trozo de pastel y un trozo correspondiente de la copia. Obviamente, esto no se parece a una receta real. No existe una planimetría punto por punto entre los «trozos» de pastel y las palabras, o las letras de la receta. Si las palabras de la receta corresponden a algo, no es a trozos aislados del pastel acabado, sino a etapas aisladas del procedimiento para hacer el pastel.

No comprendemos todavía todo, ni siquiera la mayoría de los pasos sobre cómo se desarrollan los animales a partir del huevo fertilizado. Sin embargo, las indicaciones se inclinan hacia el hecho de que los genes actúan mucho más como una receta que como una copia. Por supuesto, la analogía de la receta es buena, mientras que la analogía de la copia, aunque se utiliza a menudo sin pensar en los libros de texto elementales, en especial los más recientes, es errónea en casi todos sus detalles. El desarrollo embrionario es un proceso. Es una secuencia ordenada de sucesos, como el procedimiento para hacer un pastel, excepto que hay millones de pasos más, y que diferentes etapas transcurren de manera simultánea en muchas partes diferentes del «plato» que se está preparando. La mayoría de las etapas implican una multiplicación celular, generándose un número prodigioso de células, algunas de las cuales mueren y otras se juntan para formar órganos, tejidos y otras estructuras multicelulares. Como vimos en un capítulo anterior, la *manera* como se comporta una célula determinada no depende de los genes que contiene –ya que todas las células del cuerpo contienen el mismo conjunto de genes– sino de qué subgrupo de genes está activado en esa célula. En cualquier lugar de un cuerpo en desarrollo, en cualquier momento durante el desarrollo, sólo se activará una minoría de genes. Otros grupos de genes se activarán en distintas partes del cuerpo y en diferentes momentos durante el desarrollo. Qué genes sean los que se activen en cualquier célula en cualquier momento depende de las condiciones químicas existentes en su interior. Lo que, a su vez, depende de las condiciones anteriores existentes en esa parte del embrión.

Además, los efectos que tiene un gen cuando se activa dependen de lo que haya en esta parte localizada del embrión, para que pueda tener un efecto sobre ello. Un gen activado en células situadas en la base de la médula espinal durante la tercera semana de desarrollo tendrá un efecto totalmente diferente que el mismo gen activado en células situadas en el hombro en la decimosexta semana de desarrollo. Así pues el efecto, si hay alguno, que ejerce un gen *no* es una simple propiedad del mismo, sino que es una propiedad del gen en interacción con la historia reciente de su medio ambiente circundante en el embrión. Esto convierte en un disparate la idea de que los genes son como una copia para un cuerpo. La misma cosa era cierta, si se recuerda, de los biomorfos del ordenador.

No hay, entonces, una simple cartografía punto por punto, entre los genes y los trozos del cuerpo, más que la que hay entre las palabras de una receta y las migas del pastel. Los genes, en su conjunto, pueden considerarse como un conjunto de instrucciones para llevar a cabo un proceso. El lector puede preguntarse cómo, en este caso, es posible que se ganen la vida los genetistas. ¿Cómo es posible, incluso, hablar, dejemos aparte el investigar, de un gen «para» los ojos azules, o un gen «para» el daltonismo? ¿No implica el hecho de que los genetistas puedan estudiar efectos de un solo gen como éstos el que haya, realmente, algún tipo de equivalencia un gen/un poco de cuerpo? ¿No prueba esto lo que he estado exponiendo, de que un conjunto de genes es una receta para el desarrollo de un cuerpo? No, ciertamente no, y es importante comprender el porqué.

Quizá, la mejor forma de verlo sea volver a la analogía de la receta. Estamos de acuerdo en que no se puede dividir un pastel en las migas que lo componen y decir: «Esta miga corresponde a la primera palabra de la receta, esta otra a la segunda», etcétera. En ese sentido, estaremos de acuerdo en que toda la receta equivale a todo el pastel. Pero supongamos que cambiamos una palabra en la receta; por ejemplo, que se suprime «levadura química» o que se cambia por «levadura de cerveza». Cocemos 100 pasteles de acuerdo con la nueva versión de la receta, y 100 pasteles de acuerdo con la versión antigua de la receta. Existe una diferencia esencial entre los dos grupos de 100 pasteles, y esta *diferencia* se debe a una palabra de diferencia entre las dos recetas. Aunque no haya una equivalencia punto por punto entre las palabras y las migas del pastel, hay una equivalencia punto por punto entre la *diferencia* de palabras y la *diferencia* de pasteles. La «levadura química» no corresponde a ninguna parte del pastel: su influencia afecta a la fermentación y, por tanto, a la forma final del pastel. Si se suprime «fermentación química», o se reemplaza por «harina», el pastel no se hinchará. Si se sustituye por «levadura de cerveza», el pastel se hinchará, pero tendrá un gusto más parecido al pan. Existirá una diferencia segura, identificable entre los pasteles cocidos, de acuerdo con la versión original y las versiones «mutadas» de la receta, aun cuando no haya ningún «trozo» determinado de ningún pastel que se corresponda con las palabras en cuestión. Ésta es una buena analogía de lo que sucede cuando se muta un gen.

Y una analogía incluso mejor, ya que los genes ejercen efectos cuantitativos y las mutaciones cambian la magnitud cuantitativa de esos efectos, sería un cambio de «350 grados» a «450 grados». Los pasteles cocidos de acuerdo con la versión mutada de la receta, a una temperatura más elevada, saldrán diferentes, no sólo en parte sino en toda su sustancia, de los pasteles cocidos de acuerdo con la versión a baja temperatura. Pero la analogía es aún así demasiado simple. Para estimular la «cocción» de un niño, no deberíamos imaginarnos un solo proceso en un solo horno, sino una maraña de cintas transportadoras, pasando diferentes partes del manjar a través de 10 millones de hornos miniaturizados, en serie y en paralelo, aportando cada horno una combinación diferente de sabores, a partir de 10 000 ingredientes básicos. El punto de la analogía de la cocción, que los genes no son una copia sino una receta para un proceso, es mucho más persuasivo a partir de la versión compleja de la analogía que a partir de la simple.

Es el momento de aplicar esta lección a la cuestión de la

herencia de las características adquiridas. Lo importante sobre la construcción de algo, a partir de una copia, en contraposición con una receta, es que el proceso es *reversible. Si* se tiene una casa, es fácil reconstruir una copia de sus planos. Sólo hay que medir todas las dimensiones de la casa y reducirlas a escala. Obviamente, si la casa fuese a «adquirir» algunas características —por ejemplo, que se tirase una pared interior para dejar una planta baja diáfana— la «copia inversa» registraría la alteración con fidelidad. Esto mismo harían los genes, si fuesen una descripción del cuerpo adulto. Si los genes fuesen una copia, sería fácil imaginar que cualquier característica que adquiriese un cuerpo durante su vida podría transcribirse en el código genético, y de aquí pasarla a la generación siguiente. El hijo del herrero podría heredar las consecuencias del ejercicio de su padre. Sin embargo, debido a que los genes no son una copia sino una receta, no es posible. No podemos imaginarnos que las características adquiridas sean heredadas más de lo que podemos imaginarnos lo siguiente. Un pastel tiene un trozo cortado. La descripción de la alteración es enviada a la receta, y ésta cambia, de manera que el pastel siguiente, de acuerdo con la receta alterada, sale del horno con un trozo ya limpiamente cortado.

Los lamarckianos parecen ser aficionados a los callos, así que usemos este ejemplo. Nuestro hipotético cajero tiene unas manos suaves, cuidadas, excepto un duro callo en el dedo medio de su mano derecha, el que utiliza para escribir. Si las generaciones de sus descendientes escriben todos mucho, los lamarckianos esperarían que los genes que controlan el desarrollo de la piel en esta región se alterarían de forma que los niños nacerían con el dedo apropiado ya endurecido. Si los genes fuesen una copia esto sería fácil. Habría un gen «por» cada milímetro cuadrado (o una unidad pequeña apropiada) de piel. Toda la superficie de la piel de un cajero adulto sería «explorada», registrándose con cuidado la dureza de cada milímetro cuadrado y enviándose esta descripción de vuelta a los genes «para» este milímetro cuadrado determinado, en realidad, a los genes apropiados en sus espermatozoides.

Pero los genes no son una copia. No tiene sentido que haya un gen «por» cada milímetro cuadrado. Tampoco que el cuerpo del adulto pueda ser explorado y su descripción enviada de vuelta a los genes. No podrían «buscarse» las «coordenadas» de un callo en el registro genético y alterar los genes «apropiados». El desarrollo embrionario es un proceso en el que participan todos los genes funcionantes; un proceso que, si se sigue correctamente, dará como resultado un cuerpo adulto; pero es un proceso irreversible, por su propia naturaleza. La herencia de las carac-

terísticas adquiridas no sólo *no* tiene lugar: *no podría* tener lugar en cualquier forma de vida cuyo desarrollo embrionario sea epigenético, más que preformacionista. Cualquier biólogo que defienda el lamarckismo está, aunque pueda escandalizarse al oírlo, defendiendo implícitamente una embriología atomista determinista, y reduccionista. No quisiera agobiar al lector medio con este pequeño rosario de palabras pretenciosas: simplemente, no pude resistir la ironía, ya que los biólogos que están cerca de simpatizar con el lamarckismo de hoy también les gusta utilizar esa misma jerga de palabras, en particular, para criticar a otros.

Esto no quiere decir que, en algún lugar del universo, no pueda haber algún sistema extraño de vida, en el que la embriología *sea* preformacionista; una forma de vida que tenga realmente una «genética de copia», y que pueda, por tanto, heredar características adquiridas. Todo lo que he demostrado hasta ahora es que el lamarckismo es incompatible con la embriología, según la conocemos. Sin embargo, la afirmación que hice al principio del capítulo iba más allá: decía que, incluso si se *pudiesen* heredar las características adquiridas, la teoría lamarckiana sería todavía incapaz de explicar la evolución adaptativa. Esta afirmación es tan firme que se intenta aplicar a todas las formas de vida, en cualquier lugar del universo. Se basa en dos líneas de razonamiento, una relacionada con dificultades sobre el principio del uso y el desuso, la otra con problemas adicionales con la herencia de características adquiridas. Las describiré en orden inverso.

El problema con las características adquiridas es básicamente éste. Está muy bien heredarlas, pero no todas las características adquiridas son mejores. Por supuesto, la mayor parte son lesivas. Obviamente, la evolución no va a proceder en dirección hacia una mejora adaptativa, si las características adquiridas se heredan de forma indiscriminada: transmitiendo las fracturas de piernas y las cicatrices de la viruela a lo largo de las generaciones, de la misma forma que los pies endurecidos o la piel bronceada por el sol. La mayor parte de las características que adquiere cualquier máquina, según va envejeciendo, tienden a ser destrozos acumulados por el tiempo: se agota. Si fuesen recogidas mediante algún proceso de registro e introducidas en la copia de la generación siguiente, las generaciones sucesivas se volverían más y más decrépitas. En lugar de comenzar otra vez con una copia nueva, cada generación comenzaría su vida gravada y marcada por las cicatrices debidas al desgaste acumulado y a las lesiones de las generaciones previas.

Este problema no es necesariamente insuperable. No puede negarse que algunas características adquiridas son mejoras y es

teóricamente posible que el mecanismo de la herencia pudiese discriminar de alguna manera las mejoras de las lesiones. Pero tratar de comprender cómo podría funcionar esta discriminación nos induce a pensar por qué las características adquiridas *son* a veces mejoras. ¿Por qué, por ejemplo, las áreas de piel que se utilizan, como las plantas de los pies de una persona que corre con los pies desnudos se vuelven más gruesas y ásperas? A primera vista, parecería más probable que la piel se volviera más fina: en la mayoría de las máquinas, las piezas sujetas a un desgaste natural se vuelven más delgadas; por una razón obvia, el desgaste elimina partículas en lugar de añadirlas.

Los darwinistas tienen una respuesta fácil. La piel sujeta a un desgaste natural se vuelve más gruesa, porque la selección natural en el pasado ha favorecido a aquellos individuos cuya piel respondió al desgaste de esta manera ventajosa. De manera similar, la selección natural favoreció a aquellos miembros de las generaciones ancestrales que respondieron a la luz del sol bronceándose. Los darwinistas mantienen que la única razón por la que incluso una minoría de características adquiridas son mejoras es que hay un respaldo debido a una selección darwiniana en el pasado. En otras palabras, la teoría lamarckiana puede explicar las mejoras adaptativas en la evolución sólo a lomos de la teoría darwinista. Ya que la selección darwinista está aquí en el transfondo, para asegurar que algunas características son ventajosas, y para facilitar un mecanismo que discrimine las adquisiciones ventajosas de las desventajosas, la herencia de las características adquiridas podría, posiblemente, conducir a alguna mejora evolutiva. Pero una *mejora* como ésta se debe en su totalidad al respaldo darwinista. Nos vemos forzados a volver atrás hacia el darwinismo para explicar el aspecto adaptativo de la evolución.

Lo mismo es cierto de una clase de mejoras adquiridas bastante más importante, aquellas que agrupamos juntas bajo el título de aprendizaje. Durante el transcurso de su vida, un animal se vuelve más hábil en la tarea de ganarse la vida. El animal aprende lo que es bueno para él y lo que no lo es. Su cerebro almacena una gran biblioteca de recuerdos sobre su mundo, y sobre qué acciones conducen hacia consecuencias deseables y cuáles hacia consecuencias indeseables. Una gran parte del comportamiento del animal se inscribe bajo el título de características adquiridas, y una gran parte de esta clase de adquisiciones —«aprendizaje»— se merecen realmente el título de mejoras. Si los padres pudiesen transcribir, de alguna manera, la sabiduría de la experiencia de toda una vida en sus genes, de forma que su descendencia naciese con una biblioteca de experiencias indirectas creada y lista para ser utilizada, esos descendientes po-

drían comenzar su vida un paso por delante. El progreso evolutivo podría acelerarse, ya que la habilidad adquirida y la sabiduría se incorporarían a los genes automáticamente.

Pero todo esto presupone que los cambios en el comportamiento que llamamos aprendizaje son, por supuesto, mejoras. ¿Por qué *deberían* ser mejoras, necesariamente? Los animales aprenden, de hecho, lo que es bueno para ellos, más que lo que les perjudica, pero ¿por qué? Los animales tienden a evitar acciones que en el pasado les han producido dolor. Pero el dolor no es una sustancia. El dolor es sólo aquello que el cerebro trata como dolor. Es una gran suerte que aquellos sucesos que son tratados como dolorosos, por ejemplo un pinchazo violento de la superficie corporal, sean también los que tiendan a poner en peligro la supervivencia del animal. Podríamos imaginarnos fácilmente una raza de animales que *disfrutasen* con las lesiones y con otros acontecimientos que pusiesen en peligro su supervivencia; una raza de animales cuyo cerebro estuviese construido de tal forma que les produjesen placer las lesiones y sintiesen como dolorosos estímulos como el sabor de una comida nutritiva, que auguran algo bueno para su supervivencia. La razón por la que no vemos estos animales masoquistas por el mundo es la razón darwiniana de que los antepasados masoquistas, por razones obvias, no habrían sobrevivido lo suficiente como para dejar descendientes que heredasen su masoquismo. Podríamos criar una raza de masoquistas hereditarios, mediante una selección artificial en jaulas almohadilladas, donde su supervivencia esté asegurada por grupos de veterinarios y de cuidadores. Pero en la naturaleza estos animales no sobrevivirían, y ésta es la razón fundamental de por qué los cambios que llamamos aprendizaje tienden a ser mejoras más que lo contrario. Hemos llegado de nuevo a la conclusión de que debe haber un respaldo darwinista para asegurar que las características adquiridas sean ventajosas.

Volvamos al principio del uso y el desuso. Principio que parece funcionar bastante bien para algunos aspectos de las mejoras adquiridas. Es una regla general que no depende de detalles específicos. La regla dice: «Cualquier parte del cuerpo que se utiliza debería desarrollarse más; cualquier parte que no se utilice debería reducirse, o incluso desaparecer.» Ya que podemos esperar que las partes útiles (y, por tanto, presumiblemente utilizadas) del cuerpo se beneficiarán desarrollándose más, mientras que las partes inútiles (que, presumiblemente, no se utilizan) podrían de igual modo no estar allí, la regla no parece tener ningún mérito. Sin embargo, hay un gran problema con este principio. Y es que, incluso si no hubiese ninguna otra objeción, es

una herramienta demasiado cruda como para explicar las adaptaciones exquisitamente delicadas que vemos en animales y plantas.

El ojo ha sido un ejemplo útil anteriormente, así que ¿por qué no usarlo otra vez? Piénsese en todas las partes funcionales cooperando de una manera intrincada: el cristalino con su transparencia clara, su corrección de color y su corrección de la aberración esférica; los músculos que pueden enfocar instantáneamente la lente del cristalino sobre cualquier objetivo situado entre unas pulgadas y el infinito; el diafragma del iris, o mecanismo de «reducción de luz», que ajusta finamente la apertura del ojo de una manera continuada, como una cámara con un medidor de luz construido en su interior y un ordenador rápido con un propósito especial; la retina, con sus 125 millones de fotocélulas codificadas para los colores; la fina red de vasos sanguíneos, que nutre cada parte de esta máquina; la red aún más fina de nervios: el equivalente de los cables de conexión y de los chips electrónicos. Introdúzcase toda esta complejidad cincelada en la mente, y pregúntese uno si podría haber sido reunida por el principio del uso y el desuso. La respuesta, me parece a mí, es un «no» obvio.

El cristalino es transparente y está corregido para las aberraciones cromáticas y esférica. ¿Se podría deber sólo al *uso*? ¿Puede aclararse un cristalino por acción del volumen de fotones que lo atraviesan? ¿Mejorará un cristalino porque se utiliza, porque lo atraviesa la luz? Por supuesto que no. ¿Por qué razón debería ser así? ¿Se distribuirían las células de la retina solas en tres clases sensibles a diferentes colores, sólo porque están siendo bombardeadas con luz de colores diferentes? De nuevo, ¿por qué razón? Una vez que existen los músculos utilizados para el enfoque, es cierto que el ejercicio los hará desarrollarse más y ser más fuertes, pero esto no hará que las imágenes estén mejor enfocadas. La verdad es que el principio del uso y el desuso es incapaz de modelar nada excepto las adaptaciones más crudas y que impresionan menos.

La selección darwinista, por otra parte, no tiene ninguna dificultad para explicar cada diminuto detalle. Una buena visión, precisa y cierta hasta los detalles más delicados, puede ser un asunto de vida o muerte para un animal. Un cristalino, correctamente enfocado y corregido contra toda aberración, puede representar toda la diferencia, para un pájaro que vuela rápido como el vencejo, entre capturar una mosca y estrellarse contra un acantilado. Un diafragma de iris bien modulado, que se cierra rápidamente cuando sale el sol, puede representar toda la diferencia entre ver a un depredador a tiempo para escapar y quedar deslumbrado durante un instante fatal. Cualquier mejo-

ra en la eficacia de un ojo, no importa lo sutil que sea ni la profundidad a la que se encuentre dentro de los tejidos internos, puede contribuir al éxito en la supervivencia y en la reproducción del animal, y, de aquí, a la propagación de los genes que hicieron posible esta mejora. Por lo tanto, la selección darwinista explica la evolución de la mejora. La teoría darwinista explica la evolución de los aparatos que tienen éxito para la supervivencia como una consecuencia directa de su propio éxito. El acoplamiento entre la explicación y lo que tiene que ser explicado es directo y detallado.

La teoría lamarckiana se basa, por otra parte, en un acoplamiento indefinido y crudo: la regla de que cualquier cosa que se utiliza mucho sería mejor si se desarrollara más. Esto equivale a una correlación entre el desarrollo de un órgano y su eficacia. Si existe esta correlación, seguro que es débil. La teoría darwinista se basa en una correlación entre la *eficacia* de un órgano y su eficacia: ¡una correlación necesariamente perfecta! Esta debilidad de la teoría lamarckiana no depende de hechos detallados sobre las formas particulares de vida que vemos en este planeta. Es una debilidad general, que se aplica a cualquier clase de adaptación de la complejidad, y pienso que debe aplicarse a la vida en cualquier parte del universo, sin importar lo ajenos y extraños que puedan ser los detalles de esa vida.

Nuestro rechazo del lamarckismo es, entonces, un poco devastador. Primero, su hipótesis principal, la herencia de características adquiridas, parece ser falsa en todas las formas de vida que hemos estudiado. Segundo, no sólo es falsa sino que tiene que ser falsa en cualquier forma de vida que se base en un tipo de embriología epigenética («receta») más que preformacionista («copia»), y esto incluye todas las formas de vida que hemos estudiado. Tercero, incluso si las afirmaciones de la teoría lamarckiana fuesen correctas, la teoría es, en principio, y por dos razones bastante diferentes, incapaz de explicar la evolución de una adaptación de la complejidad seria, no sólo en esta tierra sino en cualquier lugar del universo. Así pues, no es que el lamarckismo sea un rival equivocado de la teoría darwinista. El lamarckismo no es un rival, después de todo. No es ni siquiera un *candidato* serio como explicación de la evolución de la adaptación de la complejidad. Está sentenciado, desde su comienzo, como rival potencial del darwinismo.

Hay otras pocas teorías que han sido, e incluso ocasionalmente todavía lo son, propuestas como alternativas a la selección darwinista. Una vez más, demostraré que no son serias. Demostraré (aunque es obvio) que estas «alternativas» —«neutralismo», «mutacionismo», etc.— pueden, o no, ser responsables de

cierta proporción de cambios evolutivos observados, pero no pueden ser responsables de la *adaptación* de los cambios evolutivos, esto es, de los cambios en el sentido de la construcción de los mecanismos mejorados para la supervivencia como los ojos, oídos, articulación del codo, y los dispositivos de navegación por eco. Por supuesto que una gran cantidad de cambios evolutivos puede que no sean adaptaciones, en cuyo caso estas teorías alternativas podrían ser importantes en partes de la evolución, pero sólo en las partes aburridas de la evolución, no en aquellas relacionadas con lo que hay de especial sobre la vida en contraposición con la falta de vida. Esto queda claro en el caso de la teoría neutralista de la evolución. Tiene una larga historia, pero es particularmente fácil de comprender en su moderno disfraz molecular, en el que ha sido promovida en especial por el gran genetista japonés Motoo Kimura, cuyo estilo de prosa en inglés, incidentalmente, avergonzaría mucho a un orador nativo.

Hemos tenido ya un breve encuentro con la teoría neutralista. La idea, recordemos, es que diferentes versiones de la misma molécula, por ejemplo, versiones de la molécula de hemoglobina que se diferencian en sus secuencias de aminoácidos, son exactamente igual de eficaces. Ello significa que las mutaciones de una versión alternativa de la hemoglobina a otra son *neutras* en lo que respecta a la selección natural. Los neutralistas creen que la inmensa mayoría de los cambios evolutivos, a nivel de genética molecular, son neutros, *fortuitos* con respecto a la selección natural. La escuela alternativa de genetistas, llamados seleccionistas, cree que la selección natural es una fuerza potente, incluso a nivel de detalle, en cada punto a lo largo de las cadenas moleculares.

Es importante distinguir dos cuestiones diferentes. Primero está la cuestión relevante en este capítulo: si el neutralismo representa una alternativa a la selección natural como explicación de la adaptación de la evolución. En segundo lugar, está la cuestión de si la mayor parte de los cambios evolutivos que tienen lugar en la actualidad son adaptaciones. Ya que estamos hablando sobre un cambio evolutivo de una forma molecular a otra, ¿qué probabilidad hay de que el cambio se produzca mediante la selección natural, y qué probabilidad hay de que sea un cambio neutral que se produjo mediante una desviación fortuita? Sobre esta segunda cuestión, se ha establecido una feroz batalla entre los genetistas moleculares, donde una parte gana el primer combate, y luego gana la otra. Pero si centramos nuestro interés en la adaptación —la primera cuestión— todo se reduce a una tormenta en un vaso. En lo que respecta a nosotros, una mutación neutra podría también no existir porque ni noso-

tros, ni la selección natural, podemos verla. Una mutación neutra *no es* una mutación de ningún tipo ¡cuando estamos pensando en piernas, brazos, alas, ojos o conducta! Para usar de nuevo la analogía de la receta, el plato sabrá lo mismo aunque ésta se haya «mutado» hacia un tipo de impresión diferente. En cuanto a lo que estamos tratando ahora, el resultado final del plato sigue siendo todavía la misma receta, esté impresa así, *así* o **así**. Los genetistas moleculares son como impresores quisquillosos. Les preocupa la forma real de las palabras con las que están escritas las recetas. A la selección natural no le preocupa, ni tampoco debería preocuparnos a nosotros, al hablar de la evolución de la adaptación. Cuando nos preocupen otros aspectos de la evolución, como por ejemplo el ritmo de evolución en distintas descendencias, las mutaciones neutras tendrán un gran interés.

Incluso el neutralista más ardiente está de acuerdo en admitir que la selección natural es la responsable de todas las adaptaciones. Todo lo que dice es que la mayor parte de los cambios evolutivos no son adaptaciones. Puede que esté en lo cierto, aunque una de las escuelas de genética no lo estaría. Tengo la esperanza de que ganen los neutralistas, porque esto facilitaría mucho la resolución de las relaciones evolutivas y de los ritmos de evolución. Todo el mundo en los dos bandos está de acuerdo en que la evolución neutra no puede conducir a una mejora en la adaptación, por la simple razón de que la evolución neutra es, por definición, casual; y un cambio que conduce a una adaptación es, por definición, no casual. Una vez más, no hemos conseguido encontrar una alternativa a la selección darwinista, como explicación de la característica de la vida que la distingue de la no existencia de vida, la denominada adaptación de la complejidad.

Llegamos ahora a otro rival histórico del darwinismo: la teoría «mutacionista». Nos resulta difícil comprenderla ahora pero, a principios de siglo, cuando se describió por primera vez el fenómeno de la mutación, no se contempló como una parte necesaria de la teoría de Darwin, sino como ¡una teoría *alternativa* para explicar la evolución! Había una escuela de genetistas, llamados mutacionistas, que incluía nombres tan famosos como Hugo de Vries y William Bateson, que estaban entre los primeros que volvieron a descubrir los principios de Mendel, Wilhelm Johannsen, el inventor de la palabra gen, y Thomas Hunt Morgan, el padre de la teoría cromosómica de la herencia. De Vries en particular estaba impresionado por la magnitud del cambio que podía infligir una mutación, y pensó que las nuevas especies se originaban siempre a partir de una mutación única importante, él y Johannsen creían que la mayoría de las variaciones *dentro* de una especie no eran de tipo genético. Todos los mutacionistas creían que la selección tenía, como mucho, un pequeño papel erradicador que jugar en la evolución. La fuerza creativa, en realidad, era la propia mutación. La genética mendeliana se ideó no como la base del darwinismo que es hoy día, sino como una antítesis del mismo.

Es extremadamente difícil para una mente moderna responder a esta idea con algo que no sea la hilaridad, pero debemos tener cuidado para no repetirlo con el tono condescendiente del propio Bateson: «Acudimos a Darwin por su incomparable recolección de hechos [pero...] para nosotros ya no habla con autoridad filosófica. Leemos su esquema de la Evolución como podríamos leer los de Lucrecio o los de Lamarck.» Y, de nuevo, «la transformación de masas de poblaciones mediante etapas imperceptibles guiadas por la selección es, como lo vemos la mayoría de nosotros, tan inaplicable a los hechos que sólo podemos maravillarnos frente al deseo de penetración mostrado por los defensores de tales proposiciones, y a la habilidad forense gracias a la cual fue posible que pareciese aceptable incluso durante un tiempo». Fue en especial R. A. Fisher quien dio la vuelta a las cosas y demostró que, lejos de ser una antítesis del darwinismo, la herencia individual mendeliana era esencial para el mismo.

Las mutaciones son necesarias para la evolución, pero ¿cómo pudo alguien pensar que esto era suficiente? Los cambios evolutivos producen *mejoras*, en mucha mayor medida de lo que se pudiera esperar sólo con la intervención del azar. El problema con las mutaciones como única fuerza evolutiva se formula como sigue: ¿cómo es posible suponer que cada mutación *sepa* qué es bueno para un animal y qué no? De todos los cambios posibles que pudieran producirse en un mecanismo complejo existente como un órgano, la inmensa mayoría lo empeorarían. Sólo una pequeñísima minoría de cambios lo mejorarían. Cualquiera que quiera discutir que las mutaciones, sin selección, son la fuerza motora de la evolución, debe explicar cómo resulta que las mutaciones tienden a mejorar. ¿Qué misteriosa sabiduría inherente escoge que el cuerpo se mute en un sentido que mejora en lugar de empeorar? Se observará que ésta es la misma pregunta, con otro disfraz, que formulamos al hablar de lamarckismo. Los mutacionistas, huelga decirlo, no la contestaron nunca. Lo extraño es que no parece que se les haya ocurrido.

Hoy día, de una manera injusta, todo nos parece más absurdo porque crecimos creyendo que las mutaciones se producen «al azar». Si las mutaciones se producen al azar, entonces, por

definición, no pueden inclinarse hacia una mejora. Pero la escuela mutacionista no contemplaba, por supuesto, las mutaciones como producidas de una manera fortuita. Pensaban que el cuerpo tenía una tendencia inherente a cambiar en ciertas direcciones más que en otras, aunque dejaban abierta la cuestión de cómo el cuerpo «conocía» qué cambios serían buenos para él en el futuro. Mientras describimos esto como un disparate místico, es importante aclarar qué queremos significar cuando decimos que una mutación se produce al azar. Hay casualidad y casualidad, y mucha gente confunde los diferentes significados de esta palabra. Hay, de verdad, muchos aspectos en los que una mutación no se produce al azar. En lo que quiero insistir es en que estos aspectos *no* incluyen nada equivalente a una anticipación de qué es lo que mejoraría la vida del animal. Y algo parecido a una anticipación sería necesario, por supuesto, si quisiesen utilizarse las mutaciones, sin selección, para explicar la evolución. Es instructivo explorar un poco más en qué sentidos una mutación se produce, y no se produce, al azar.

El primer aspecto por el que una mutación no es casual es éste. Las mutaciones se producen por hechos físicos definidos, no de manera espontánea. Son inducidas por los llamados «mutágenos» (peligrosos porque a veces constituyen el inicio de un cáncer): los rayos X, los rayos cósmicos, las sustancias radiactivas, varias sustancias químicas e incluso otros genes denominados «genes mutadores». Segundo, no todos los genes de una especie tienen la misma probabilidad de mutar. Cada locus de los cromosomas tiene su propia *frecuencia mutacional* característica. Por ejemplo, la frecuencia con la que una mutación crea el gen responsable de la enfermedad denominada corea de Huntington (similar al baile de san Vito), en la que la gente muere al comienzo de su edad madura, es de una en 200 000. La frecuencia correspondiente para la acondroplasia (un síndrome de enanismo familiar, característico de los perros de raza basset y de raza daschsund, en el que los brazos y las piernas son demasiado cortos para el cuerpo) es unas diez veces más elevada. Estas frecuencias están medidas en condiciones normales. Si hay presentes mutágenos como los rayos X, todas las frecuencias de mutación normales resultarán incrementadas. Algunas partes de los cromosomas constituyen las llamadas «zonas calientes» *(hot spots)* con un elevado trasiego de genes, una frecuencia de mutación local muy elevada.

Tercero, en cada locus de los cromosomas, sea una zona caliente o no, las mutaciones en ciertas direcciones tienen más probabilidades que las mutaciones en sentido opuesto. Esto da lugar al fenómeno conocido como «presión mutacional» que

puede tener consecuencias evolutivas. Incluso si dos formas de la molécula de hemoglobina, la forma 1 y la forma 2, son selectivamente neutras, en el sentido de que ambas son igualmente eficientes para el transporte de oxígeno en la sangre, todavía podría representar que las mutaciones de 1 hacia 2 son más frecuentes que las contrarias, de 2 hacia 1. En este caso, la presión mutacional tenderá a hacer que la forma 2 sea más frecuente que la forma 1. La presión mutacional se dice que es cero en un locus cromosómico determinado, si la frecuencia de mutaciones en un sentido está compensada por la frecuencia de mutaciones en el sentido opuesto.

Podemos ver ahora que la pregunta de si las mutaciones se producen al azar no es trivial. Su respuesta depende de lo que nosotros entendamos qué quiere decir al azar. Si lo tomamos en el sentido de que una «mutación al azar» significa que no está influenciada por sucesos externos, entonces los rayos X refutan el hecho de que se produzcan al azar. Si pensamos que una «mutación al azar» implica que todos los genes tienen la misma probabilidad de mutar, entonces las zonas calientes *(hot spots)* sirven para demostrar que no se producen al azar. Si pensamos que «mutación al azar» implica que la presión mutacional es cero en todas las localizaciones cromosómicas, una vez más, no son casuales. Sólo si definimos el concepto «al azar» con el significado de «ausencia de una tendencia general hacia la producción de mejoras corporales», es cuando las mutaciones se producen verdaderamente al azar. Los tres tipos de falta de aleatoriedad real que hemos considerado son incapaces de mover la evolución en dirección hacia una mejora en la adaptación, en contraposición con cualquier otra dirección (funcionalmente) «aleatoria». Hay un cuarto tipo de falta de aleatoriedad, en el que esto es también cierto, aunque ligeramente menos obvio. Será necesario dedicarle un poco de tiempo, porque todavía es motivo de confusión, incluso para algunos biólogos modernos.

Hay gente para quienes «aleatorio» tendría el significado siguiente, en mi opinión, bastante extravagante. Cito un párrafo de dos oponentes del darwinismo (P. Saunder y M.-W. Ho), acerca de su concepción de lo que el darwinismo cree sobre las «mutaciones aleatorias». «El concepto neodarwinista de mutación aleatoria lleva consigo la mayor falacia concebible.» «*Todos* los cambios son posibles e *igualmente probables*» (pongo énfasis en esto). Lejos de mantener esta creencia, ¡no sé cómo se podría empezar a adaptar para que tuviera algún *significado*! ¿Qué podría significar mantener que «todos» los cambios tienen la misma probabilidad? ¿*Todos* los cambios? Para que dos o más cosas tengan «la misma probabilidad», es necesario que puedan defi-

nirse como sucesos discontinuos. Podemos decir, por ejemplo, que «la cara y la cruz de una moneda tienen las mismas probabilidades de salir», porque cara y cruz representan dos sucesos discontinuos. Pero «todos los cambios posibles» para el cuerpo de un animal no son sucesos discontinuos de este tipo. Tomemos dos acontecimientos posibles: «El rabo de una vaca aumenta una pulgada» y «El rabo de una vaca aumenta dos pulgadas». ¿Son dos acontecimientos distintos, que tienen, por tanto, «la misma probabilidad»? ¿O son, simplemente, variantes cuantitativas del mismo suceso?

Está claro que se ha establecido un tipo de caricatura de un darwinista cuya noción de aleatoriedad es un absurdo, si no un extremo carente de significado. Me costó cierto tiempo comprenderla, porque era muy ajena a la forma de pensar de los darwinistas que conozco. Pero creo que ahora la entiendo y trataré de explicarla, ya que pienso que nos ayuda a comprender qué hay detrás de mucha de la supuesta oposición al darwinismo.

La variación y la selección trabajan juntas para producir la evolución. Los darwinistas dicen que la variación es aleatoria, en el sentido de que no está dirigida hacia una mejora, y que la tendencia hacia una mejora en la evolución viene a través de la selección. Podemos imaginarnos un tipo de espectro continuo de doctrinas evolutivas, con el darwinismo en un extremo y el mutacionismo en el otro. Un mutacionista extremo cree que la selección no juega ningún papel en la evolución. El sentido en que transcurre la evolución viene determinado por el sentido de las mutaciones ofrecidas. Por ejemplo, supongamos que escogemos el aumento de tamaño del cerebro humano que ha tenido lugar durante los últimos millones de años de nuestra evolución. Los darwinistas dicen que la variación ofrecida para que se produjese una selección de mutaciones incluiría unos individuos con cerebros más pequeños y otros con cerebros más grandes; la selección habría favorecido a estos últimos. Los mutacionistas dicen que hubo una tendencia a favor de los cerebros grandes dentro de la variación ofrecida para que se produjesen mutaciones; no hubo selección (o necesidad de selección) después de ofrecida la variación; los cerebros aumentaron de tamaño porque los cambios mutacionales mostraban una tendencia en dirección hacia los cerebros más grandes. Para resumir este punto: en la evolución existía una tendencia en favor de los cerebros más grandes; esta tendencia procedería sólo de la selección (el punto de vista darwinista) o sólo de las mutaciones (el punto de vista mutacionista); podemos imaginarnos un espectro continuo entre estos dos puntos de vista, casi un tipo de intercambio entre dos posibles orígenes de tendencias evolutivas. Un

punto de vista intermedio sería que hay una *cierta* tendencia en las mutaciones hacia el aumento de tamaño del cerebro, y que la selección aumenta esta tendencia en la población superviviente.

El elemento caricaturesco viene introducido en el retrato de lo que quieren significar los darwinistas cuando declaran que no existe ninguna tendencia en las variaciones mutacionales ofrecidas en la selección. Para mí, un darwinista de la vida real significa sólo que las mutaciones no muestran una tendencia sistemática en dirección hacia la introducción de mejoras en la adaptación. Pero para la caricatura del darwinista fuera de la realidad de la vida significa que todos esos cambios posibles tienen «las mismas probabilidades». Dejando aparte la imposibilidad de tales creencias, ya descritas, la caricatura de un darwinista se piensa que consiste en creer que el cuerpo es una masa de arcilla infinitamente maleable, lista para ser modelada por la poderosa selección, en cualquier forma que ésta pudiese favorecer. Es importante comprender la diferencia entre el darwinista de la vida real y su caricatura. Lo haremos en términos de un ejemplo concreto, las diferencias en técnicas de vuelo entre los murciélagos y los ángeles.

Los ángeles siempre han sido retratados con alas que brotan de sus espaldas, dejando sus brazos libres de las plumas. Los murciélagos, por otra parte, junto con los pájaros y los pterodáctilos, no tienen brazos independientes. Sus brazos ancestrales se han incorporado a las alas, y no pueden utilizarlos, o apenas de una manera muy torpe, con otros propósitos, como coger comida. Oiremos ahora una conversación entre un darwinista de la vida real y una caricatura extrema de un darwinista.

Vida real: No comprendo cómo no evolucionaron las alas en los murciélagos como en los ángeles. Pienso que podrían utilizar un par de patas anteriores libres. Los ratones utilizan sus patas anteriores para coger comida y mordisquearla, mientras que los murciélagos parecen muy torpes en el suelo sin estas patas. Supongo que una respuesta podría ser que las mutaciones nunca facilitaron las variaciones necesarias. Nunca hubo un murciélago ancestral mutante que tuviese unas alas que brotasen del centro de su lomo.

Caricatura: Vaya disparate. La selección lo es todo. Si los murciélagos no tienen alas como los ángeles, significa que la selección no favoreció el desarrollo de esta clase de alas. Ciertamente hubo murciélagos mutantes con alas que brotaban del centro de su lomo, pero la selección no favoreció su desarrollo.

Vida real: Bien, estoy bastante de acuerdo en que la selección no hubiese favorecido su desarrollo si *hubiesen* brotado. Porque hubiesen incrementado el peso del animal, y el peso extra

es un lujo que ningún avión puede permitirse. Pero ¿no piensa que las mutaciones suministrarían siempre la variación necesaria a *cualquier cosa* que la selección pudiese favorecer, en principio?

Caricatura: Ciertamente que sí. La selección lo es todo. Las mutaciones son aleatorias.

Vida real: Bien, las mutaciones son aleatorias, pero ello sólo significa que no pueden ver el futuro y planificar lo que es bueno para el animal. No significa que sea posible *cualquier* cosa. ¿Por qué piensa que ningún animal exhala fuego por la nariz como un dragón, por ejemplo? ¿No sena útil para cazar y cocinar las presas?

Caricatura: Es fácil. La selección lo es todo. Los animales no exhalan fuego por la nariz porque no les compensaría hacerlo. Los mutantes que exhalan fuego fueron eliminados por la selección natural, quizá porque producir fuego sería demasiado costoso en energía.

Vida real: No creo que hayan existido, nunca, mutantes que exhalaran fuego. De haberlos habido, presumiblemente ¡habrían corrido el riesgo de quemarse ellos mismos!

Caricatura: Vaya disparate. Si éste fuese el único problema, la selección habría favorecido el desarrollo de fosas nasales recubiertas de asbesto.

Vida real: No creo que ninguna mutación produjese nunca fosas nasales recubiertas de asbesto. No creo que los animales mutantes pudiesen secretar asbesto, por la misma razón que las vacas mutantes no podrían saltar a la Luna.

Caricatura: Cualquier vaca mutante que saltara a la Luna sería eliminada rápidamente por la selección natural. Tú sabes que no hay oxígeno allá arriba.

Vida real: Me sorprende que no postules la presencia de vacas mutantes con trajes espaciales y máscaras de oxígeno controladas genéticamente.

Caricatura: ¡Buena idea! Supongo que la explicación real sería que no es rentable para las vacas saltar a la Luna. No debemos olvidar el coste energético de alcanzar la velocidad de despegue.

Vida real: Eso es absurdo.

Caricatura: Tú no eres realmente un verdadero darwinista. ¿Qué eres tú, algún tipo de criptomutacionista desviacionista?

Vida real: Si así lo crees, deberías conocer a un mutacionista de verdad.

Mutacionista: ¿Es esto una discusión entre grupos de darwinistas, o puede entrar cualquiera? El problema con vosotros dos es que dais demasiada importancia a la evolución. Todo lo que la selección puede hacer es eliminar las grandes deformidades, los monstruos. Realmente, no puede producir una evolución constructiva. Volved a la evolución de las alas de los murciélagos. Lo que sucedió en realidad es que en una antigua población de animales que vivían en el suelo comenzaron a aparecer mutaciones con dedos elongados y membranas de pie entre ellos. Según fueron transcurriendo las generaciones, estas mutaciones se fueron haciendo más frecuentes hasta que, eventualmente, toda la población tenía alas. No tuvo nada que ver con la selección. Lo único que hubo fue una tendencia intrínseca en la constitución ancestral de los murciélagos para desarrollar alas.

Vida real y Caricatura (al unísono): ¡Misticismo indecente! Vuelve al siglo pasado, donde está tu sitio.

Espero no parecer vanidoso si asumo que las simpatías del lector no están ni con el Mutacionista ni con la Caricatura de un darwinista. Asumo que el lector esta de acuerdo con el darwinista de la Vida real como, por supuesto, lo estoy yo. La Caricatura no existe, en realidad. Lamentablemente, algunas personas *piensan* que existe, y piensan que, como están en desacuerdo con él, están en desacuerdo con el darwinismo. Hay una escuela de biólogos que tienen la costumbre de decir algo como lo que sigue. El problema con el darwinismo es que ignora los límites impuestos por la embriología. Los darwinistas (y es aquí donde entra en juego la caricatura) piensan que si la selección favoreciera algún cambio en la evolución resultaría que la variación mutacional necesaria quedaría disponible. Un cambio mutacional tiene la misma probabilidad en cualquier sentido: la selección facilita la única influencia.

Pero cualquier darwinista de la vida real reconocería que, aunque cualquier gen de cualquier cromosoma pueda mutar en cualquier momento, las consecuencias de la mutación sobre los *cuerpos* están severamente limitadas por los procesos embriológicos. Si alguna vez hubiese dudado de esto (no lo he hecho), mis dudas habrían sido disipadas por las simulaciones de los biomorfos de mi ordenador. No se puede postular una mutación «que haga» brotar alas en mitad de la espalda. Las alas, o cualquier otra cosa, pueden evolucionar sólo si el proceso de desarrollo les permite hacerlo. Nada «brota» de una forma mágica. Tiene que hacerse a través del proceso de desarrollo embrionario. Sólo una minoría de las cosas que puede concebirse que evolucionen están permitidas realmente por el *status quo* de los procesos de desarrollo existentes. Debido a la forma en que se desarrollan los brazos, es posible que las mutaciones actúen aumentando la longitud de los dedos y produciendo el crecimiento de pliegues de piel entre ellos. Pero puede que no haya nada en la embriología de la espalda que conduzca a que «broten» alas de ángel. Los genes pueden mutarse hasta que produzcan un color azul en la cara, pero a ningún mamífero le brotarán alas como las de un ángel, a menos que sus procesos embriológicos sean susceptibles a esta clase de cambio.

Ahora bien, en tanto no conozcamos todos los pros y contras de cómo se desarrollan los embriones, hay espacio para no estar de acuerdo sobre la probabilidad de que estas mutaciones concretas hayan, o no, existido. Podría resultar, por ejemplo, que no haya nada en la embriología de los mamíferos que prohíba las alas de ángel, y que la Caricatura del darwinista fuese cierta, en este caso *concreto,* al sugerir que podían originarse brotes de alas de ángel pero que no serían favorecidas por la selección. O podría resultar que cuando sepamos más sobre embriología veamos que las alas de ángel no tuvieron nunca un comienzo, y que, por tanto, la selección nunca tuvo la posibilidad de favorecerlas. Hay una tercera posibilidad, que deberíamos citar para que estuvieran completas, que la embriología no permitiese la posibilidad de desarrollo de alas de ángel y que la selección no las hubiese favorecido nunca aunque hubiesen existido. Pero en lo que debemos insistir es en que no podemos ignorar las limitaciones que impone la embriología sobre la evolución. Todos los darwinistas serios estarían de acuerdo sobre esto y, aun así, algunas personas describen a los darwinistas como negándolo. Resulta que la gente que hace mucho ruido sobre las «limitaciones del desarrollo» como una fuerza supuestamente antidarwinista, están confundiendo el darwinismo con la caricatura del darwinismo que parodié antes.

Todo esto empezó con una discusión sobre qué queremos significar cuando decimos que una mutación es aleatoria. Cité tres aspectos en los que las mutaciones no son aleatorias: si está inducida por los rayos X, etc.; la frecuencia de mutación es diferente para distintos genes; y la frecuencia de las mutaciones en un sentido no tiene que ser igual a la frecuencia en el sentido contrario. Hemos añadido un cuarto aspecto, en el que las mutaciones no serían aleatorias, en el sentido de que sólo pueden alterarse los procesos *existentes* de desarrollo embrionario. No pueden conjurar, partiendo del humo, cualquier cambio concebible que pudiese favorecer la selección. La variación disponible para que actúe la selección está limitada por los procesos embriológicos, en la forma que existen realmente.

Hay un quinto aspecto, en el que las mutaciones *podrían* haber sido no aleatorias. Podemos imaginarnos una forma de mutación que estuviese sistemáticamente predispuesta, en el sentido de mejorar la adaptación del animal a su vida. Pero, aunque podamos imaginarlo, nadie ha estado nunca cerca de sugerir por qué clase de mecanismo sucede así. Es sólo en este quinto aspecto, el «mutacionista», en el que el verdadero darwinista, el de la vida real, insiste en que las mutaciones son aleatorias. Las mutaciones no están siempre influenciadas en el sentido de

una mejora adaptativa, y no se conoce ningún mecanismo (para poner las cosas suavemente) que pudiese guiar a las mutaciones en direcciones que no son aleatorias en este quinto sentido. Las mutaciones son aleatorias con respecto a los cambios adaptativos, aunque no lo son en otros muchos aspectos. Es la selección, y sólo la selección, la que dirige la evolución en direcciones que no son aleatorias respecto a las ventajas. El mutacionismo no sólo está equivocado. Nunca podría haber sido correcto. No es, en principio, capaz de explicar la evolución de las mejoras. El mutacionismo pertenece al mismo grupo que el lamarckismo, no como un rival refutado del darwinismo sino como un rival que no lo es, después de todo.

Lo mismo es cierto del siguiente supuesto rival de la selección darwinista, defendido por el genetista de Cambridge Gabriel Dover, bajo el antiguo nombre de «fuerza molecular» (como todas las cosas están hechas de moléculas, no resulta obvio por qué el hipotético proceso de Dover debería merecer el nombre de fuerza *molecular* más que cualquier otro proceso evolutivo; me recuerda a un hombre que conocí, que se quejaba de dolor de estómago, y solucionaba el problema utilizando su fuerza mental). Motoo Kimura y los demás defensores de la teoría neutralista de la evolución no hacen, como vimos, falsas reclamaciones en defensa de su teoría. No se hacen ilusiones de que las desviaciones aleatorias sean un rival para la selección como explicación de la evolución adaptativa. Reconocen que sólo la selección natural puede guiar a la evolución en direcciones adaptativas. Su reclamación consiste en que muchos cambios evolutivos (de la forma que los genetistas moleculares ven estos cambios) no son adaptativos. Dover no tiene estas modestas exigencias para su teoría. Piensa que puede explicar *toda* la evolución sin la selección natural, aunque concede, generosamente, que también puede haber ¡*algo* cierto en la selección natural!

A lo largo de este libro, nuestro recurso principal, cuando consideramos estos temas, ha sido el ejemplo del ojo, aunque sólo en representación de un gran conjunto de órganos demasiado complejos y bien diseñados como para haberse producido por azar. Sólo la selección natural, que he considerado repetidamente, está cerca de ofrecer una explicación posible para el ojo humano y otros órganos comparables por su extrema perfección y complejidad. Por suerte, Dover se ha mostrado explícitamente capaz de enfrentarse con el desafío, y ha ofrecido su propia explicación sobre la evolución del ojo. Asumamos, dice, que se necesitan 1 000 etapas evolutivas para que evolucione un ojo a partir de la nada. Ello significa que necesitaremos una secuencia de 1 000 cambios genéticos para transformar un trozo de piel

desnuda en un ojo. Me parece que es una hipótesis aceptable, considerando el argumento. En términos de la Tierra de las Bioformas, significa que el animal con un trozo de piel desnuda está a una distancia de 1 000 etapas genéticas del animal con ojos.

Ahora bien, ¿cómo juzgamos el hecho de que se hayan seguido las 1 000 etapas correctas que dan como resultado el ojo tal como lo conocemos? La explicación por la selección natural es bien conocida. Reducida a su forma más simple, en cada una de las 1 000 etapas, las mutaciones ofrecen un cierto número de alternativas, sólo una de las cuales será favorecida porque ayuda a su supervivencia. Las 1 000 etapas evolutivas representan 1 000 puntos de elección sucesivos, en cada uno de los cuales la mayor parte de las alternativas conducen a la muerte. La adaptación de la complejidad de ojo moderno es el producto final de 1 000 «elecciones» sucesivas inintencionadas. Las especies han seguido un camino determinado a través del laberinto de todas las probabilidades. Había 1 000 puntos de ramificación a lo largo del camino, y en cada uno los supervivientes fueron los que tomaron la dirección que condujo a una mejora de la visión. Los bordes del camino están sembrados con los cadáveres de los que tomaron una dirección equivocada en cada uno de los 1 000 puntos sucesivos de elección. El ojo que conocemos es el producto final de una secuencia de 1 000 «elecciones» sucesivas que han tenido éxito.

Ésta fue (una forma de expresar) la explicación de la selección natural de la evolución del ojo en 1 000 etapas. Ahora veamos, ¿cuál es la explicación de Dover? Básicamente, argumenta, no habría importado la elección que realizan los descendientes en cada etapa: se habría encontrado retrospectivamente un uso para el órgano resultante. Cada paso que dieron los descendientes, según él, fue un paso al azar. En el paso 1, por ejemplo, se extendió una mutación aleatoria a través de la especie. Como la característica recién evolucionada era funcionalmente aleatoria, no ayudó en nada a la supervivencia del animal. Así pues, la especie buscó un sitio nuevo en el mundo o una nueva forma de vida en la que pudiesen utilizar esta nueva característica aleatoria impuesta en sus cuerpos. Después de haber encontrado un ambiente adecuado para la parte aleatoria de sus cuerpos, vivieron allí durante un tiempo, hasta que se originó una nueva mutación y se extendió a través de la especie. De nuevo, la especie tuvo que barrer el mundo, en busca de un sitio o una forma de vida nuevos donde pudieran vivir con su nuevo fragmento aleatorio. Al encontrarlo, el paso 2 estaría completo. Ahora, la mutación correspondiente al paso 3 se extendería por la especie, y así sucesivamente, durante 1 000 etapas, al

final de las cuales se habría formado un ojo tal como lo conocemos. Dover apunta el hecho de que el ojo humano utiliza lo que llamamos luz «visible», en lugar de infrarroja. Pero si los procesos aleatorios hubiesen impuesto uno ojo sensible a la luz infarroja, lo habríamos desarrollado, sin duda, y habríamos encontrado una forma de vida que aprovechase los rayos infrarrojos al máximo.

A primera vista, esta idea tenía una cierta posibilidad seductora, pero sólo a muy primera vista. La seducción procede de la forma claramente simétrica en la que la selección natural se pone en marcha en su cabeza. La selección natural en su forma más simple asume que el medio ambiente se impone sobre las especies y que aquellas variantes genéticas mejor adaptadas a este ambiente son las que sobreviven. El medio ambiente se impone y las especies evolucionan para adaptarse a él. La teoría de Dover le da la vuelta a esto en su cabeza. Es la naturaleza de las especies la que se «impone», en este caso por vicisitudes de las mutaciones y otras fuerzas genéticas internas en las que él tiene un interés especial. Las especies localizan entonces aquel miembro del conjunto de todos los medios ambientes que se adapta mejor a su naturaleza impuesta.

Pero la seducción de la simetría es, por otra parte, superficial. El maravilloso sinnúmero de repeticiones monótonas de la idea de Dover se despliega en toda su gloria en el momento en que empezamos a pensar en términos de números. La esencia de este esquema es que, en cada una de las 1 000 etapas, no importa la dirección en la que se dirigieron las especies, cada innovación nueva que desarrollaron era funcionalmente aleatoria, y tuvieron que encontrar un medio ambiente que les fuera propicio. La implicación es que las especies *habrían encontrado* un ambiente adecuado, no importa la rama que hubiesen seguido en cada bifurcación del camino. Ahora, pensemos cuántos ambientes posibles tenemos que postular. Hay 1 000 puntos de ramificación. Si cada punto fuese una mera bifurcación (una hipótesis conservadora, en contraposición con una ramificación en 3 o en 18, el número total de ambientes que deberían existir, en los que se pudiera vivir, en principio, para permitir que funcionase el esquema de Dover, es de 2 elevado a 1 000 (la primera ramificación suministra dos direcciones; luego cada una de éstas se dividen en dos, dando un total de cuatro; cada una de éstas se divide, dando 8, luego 16, 32, 64, ..., y así hasta $2^{1\,000}$. Este número puede escribirse un 1 con 301 ceros detrás. Es mucho más grande que el número total de átomos de todo el universo.

El supuesto rival de la selección natural propuesto por Dover

no podría funcionar nunca, no sólo en un millón de años, ni tampoco en un millón de veces más del tiempo que ha existido el universo, ni en un millón de universos que durasen un millón de veces el mismo tiempo de nuevo. Obsérvese que esta conclusión no se altera materialmente si cambiamos la hipótesis inicial de Dover, de que se necesitarían 1 000 etapas para fabricar un ojo. Si lo reducimos a tan sólo 100 etapas, que es probablemente una estimación baja, todavía llegaríamos a la conclusión de que el conjunto de ambientes viables que deberían estar esperando en el aire, o algo así, para enfrentarse con cualquier paso aleatorio que los descendientes pudiesen tomar, sería de más de un millón de millones de millones de millones de millones. Éste es un número más pequeño que el anterior, pero aún significa que la gran mayoría de los «ambientes» de Dover que deberían estar esperando en el aire tendrían que estar hechos, cada uno, de un solo átomo.

Merece la pena explicar por qué la teoría de la selección natural no es susceptible de una destrucción simétrica por una versión del «argumento de los grandes números». En el capítulo 3 pensamos en todos los animales reales y posibles situados en un gigantesco hiperespacio. Aquí estamos haciendo algo similar, pero simplificándolo, considerando las ramificaciones de los puntos evolutivos como bifurcaciones, en lugar de ramificaciones en 18 direcciones. Así pues, el conjunto de todos los animales posibles que podrían haber evolucionado en 1 000 etapas evolutivas estarían colgados de un gigantesco árbol, con ramas y ramas, de manera que el número total de ramitas terminales sería de un 1 seguido de 301 ceros. Cualquier historia evolutiva actual puede ser representada por un itinerario concreto a través de este hipotético árbol. De todos los caminos evolutivos posibles, sólo una minoría tuvo lugar en realidad. Podemos pensar que la mayoría de ese «árbol de todos los animales posibles» está escondido en la oscuridad de la no existencia. Por aquí y allá se encuentran iluminadas unas pocas trayectorias a través del árbol oscurecido. Son los caminos evolutivos que tuvieron lugar en realidad y, aunque parezcan numerosas estas ramas iluminadas, son todavía una minoría infinitésima de todo el conjunto. La selección natural es un proceso capaz de escoger su camino a través de todos los animales imaginables, y encontrar esta minoría de caminos que son viables. La teoría de la selección natural no puede ser atacada por el tipo de argumento de los grandes números con el que ataqué la teoría de Dover, porque es parte de la esencia de la teoría de la selección natural el estar cortando continuamente la mayoría de las ramas del árbol. Esto es precisamente lo que hace la selección natural. Escoge su camino paso a paso, a través del árbol de todos los animales imaginables, evitando la casi infinita mayoría de ramas estériles –animales con ojos en las plantas de sus pies, etc.– que la teoría de Dover se ve obligada a aprobar, por la naturaleza de su peculiar lógica inversa.

Nos hemos enfrentado con todas las supuestas alternativas a la teoría de la selección natural, excepto la más antigua. Se trata de la teoría que sostiene que la vida fue creada, o su evolución dirigida, por un diseñador consciente. Sería injustamente fácil demoler alguna versión concreta de esta teoría tal como la (o puede que sean dos) descrita en el Génesis. Casi todos los pueblos han desarrollado su propio mito de la creación, y la historia del Génesis fue adoptada por una tribu de pastores del Oriente Medio. No tiene un estatus más especial que la creencia propia de una tribu del oeste africano, de que el mundo fue creado a partir de los excrementos de las hormigas. Todos estos mitos tienen en común el que dependen de la intención deliberada de algún tipo de ser sobrenatural.

A primera vista, hay que hacer una distinción importante entre lo que podríamos llamar «creación instantánea» y «evolución dirigida». Los teólogos modernos con alguna sofisticación han dejado de creer en la creación instantánea. La evidencia sobre la existencia de algún tipo de evolución ha llegado a ser demasiado aplastante. Pero muchos teólogos que se llaman a sí mismos evolucionistas, por ejemplo, el obispo de Birmingham citado en el capítulo 2, introducen a Dios por la puerta trasera: le dejan un cierto papel de supervisor del curso que ha tomado la evolución, bien sea influyendo en los momentos clave de la historia evolutiva (especialmente, por supuesto, de la historia evolutiva *humana*), o incluso entrometiéndose en los sucesos diarios que se suman para constituir los cambios evolutivos.

No podemos desmentir creencias como éstas, en especial si se asume que Dios tuvo cuidado en que sus intervenciones imitaran siempre cuidadosamente lo que se hubiera esperado de la evolución por selección natural. Todo lo que podemos decir sobre estas creencias es, en primer lugar, que son superfluas y, en segundo lugar, que *asumen* la existencia de la cosa principal que queremos *explicar*, esto es, la existencia de una entidad compleja organizada. La única cosa que hace de la evolución una teoría tan clara es que explica cómo puede originarse una entidad compleja organizada, a partir de una entidad primitiva simple.

Si queremos postular la existencia de una deidad capaz de poner en marcha toda esta entidad compleja organizada en el mundo, bien sea de una manera instantánea o guiando a la evolución, esta deidad ha tenido que ser inmensamente compleja

ella misma. El creacionista, sea un inocente lector de la Biblia o un obispo culto, *postula* la existencia de un ser con una inteligencia y complejidad prodigiosas. Si vamos a permitirnos el lujo de postular la existencia de una entidad compleja organizada sin ofrecer una explicación, podríamos también reducirlo a un solo trabajo y postular la existencia de la vida tal y como la conocemos. Resumiendo, la creación divina, sea instantánea o en forma de evolución guiada, se une a la lista de las otras teorías que hemos considerado en este capítulo. Todas muestran alguna apariencia superficial de ser alternativas al darwinismo, cuyos méritos podrían comprobarse acudiendo a la evidencia. Todas resultan, cuando se las inspecciona en detalle, no ser rivales del darwinismo, después de todo. La teoría de la evolución mediante una selección natural cumulativa es la única teoría que conocemos, en principio, *capaz* de explicar la existencia de una entidad compleja organizada. Incluso si la evidencia no la favoreciese, ¡sería *todavía* la mejor teoría disponible! De hecho, la evidencia la favorece. Pero es otra historia.

Digamos la conclusión de toda la historia. La esencia de la vida es la improbabilidad estadística a una escala colosal. Cualquiera que sea la explicación de la vida, por lo tanto, no puede ser el azar. La verdadera explicación de la existencia de la vida debe incorporar la verdadera antítesis del azar. La antítesis del azar es la supervivencia no aleatoria, correctamente entendida. La supervivencia no aleatoria impropiamente entendida, no es la antítesis del azar, sino el propio azar. Existe un espectro continuo que conecta estos dos extremos, y es este espectro continuo entre la selección en una sola etapa y la selección cumulativa. La selección en una sola etapa es otra manera de etiquetar el puro azar. Esto es lo que quiero dar a entender por supervivencia no aleatoria impropiamente entendida. La *selección cumulativa*, mediante una gradación lenta y gradual, es la explicación, la única, sobre la que se puede trabajar, de las que se han propuesto en algún momento, para explicar la existencia de la vida con un diseño complejo.

Todo el libro ha estado dominado por la idea del azar, por las probabilidades astronómicamente grandes en contra del origen espontáneo del orden, la complejidad y el diseño aparente. Hemos buscado una forma de domar al azar, de extraer sus colmillos. El «azar salvaje», el azar puro y desnudo, significa un diseño ordenado que comienza a existir a partir de la nada, de un solo salto. Sería el azar salvaje, si no hubiese ojos en un momento dado, y, de repente, apareciese un ojo, en el transcurso de una generación, totalmente diseñado, perfecto y completo. Ello es posible, pero las probabilidades en contra nos mantendrían ocupados escribiendo ceros hasta el final de los tiempos. Lo mismo se aplica a las probabilidades en contra de la existencia espontánea de cualquier ser totalmente diseñado, perfecto y completo, incluyendo —no veo la forma de evitar esta conclusión— las deidades.

«Domesticar» el azar significa descomponer lo muy improbable en componentes menos improbables, ordenados en series. No importa lo improbable que sea el que una X se haya originado a partir de una Y en una sola etapa, siempre es posible concebir una serie infinita de gradaciones de intermediarios entre ellas. No importa lo improbable que pueda ser un cambio a gran escala, los cambios más pequeños son menos improbables. Y siempre que postulemos una serie suficientemente larga de intermediarios con una fina gradación, seremos capaces de derivar cualquier cosa de cualquier otra, sin invocar improbabilidades astronómicas. Sólo podemos hacerlo si hay suficiente tiempo para acomodar dentro a todos estos intermediarios. Y también sólo si hay un mecanismo para guiar cada paso en una dirección determinada, ya que, de otra manera, esta secuencia correría alocadamente en un paseo sin fin al azar.

El argumento del punto de vista darwinista del mundo es que ambas previsiones se dan, y que la selección natural cumulativa, lenta, gradual, es, en último término, la explicación a nuestra existencia. Si existen versiones de la teoría de la evolución que nieguen el lento gradualismo, y el papel central de la selección natural, pueden ser ciertas en casos concretos. Pero no pueden constituir toda la verdad, porque niegan el verdadero centro de la teoría de la evolución, que les da el poder para disolver las improbabilidades astronómicas y explicar los prodigios de un milagro aparente.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALBERTS, B., D. BRAY, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS y J. D. WATSON: *Molecular Biology of the Cell,* Nueva York, Garland, 1983. (Trad. esp.: *Biología molecular de la célula,* Barcelona, Omega, 1986.)
2. ANDERSON, D. M.: «Role of interfacial water and water in thin films in the origin of life», en BILLINGHAM, J. (ed.), *Life in the Universe,* Cambridge, Mass., MIT Press, 1981.
3. ANDERSSON, M.: «Female choice selects for extreme tail length in a widow bird», *Nature,* 299 (1982), 818-20.
4. ARNOLD, S. J.: «Sexual selection: the interface of theory and empiricism», en BATESON, P. P. G. (ed.), *Mate Choice,* Cambridge, Cambridge University Press, 1983, pp. 67-107.
5. ASIMOV, I.: *Only a Trillion,* Londres, Abelard-Schuman, 1957.
6. ASIMOV, I.: *Extraterrestrial Civilizations,* Londres, Pan, 1980. (Trad. esp.: *Civilizaciones extraterrestres,* Barcelona, Plaza & Janés, 1986.)
7. ASIMOV, I.: *In the Beginning,* Londres, New English Library, 1981.
8. ATKINS, P. W.: *The Creation,* Oxford, W. H. Freeman, 1981. (Trad. esp.: *La creación,* Barcelona, Labor, 1983, Punto Omega 267.)
9. ATTENBOROUGH, D.: *Life on Earth,* Londres, Reader's Digest, Collins & BBC, 1980.
10. BARKER, E.: «Let there be light: scientific creationism in the twentieth century», en DURANT, J. R. (ed.), *Darwinism and Divinity,* Oxford, Basil Blackwell, 1985, pp. 189-204.
11. BOWLER, P. J.: *Evolution: the history of an idea,* Berkeley, University of California Press, 1984.
12. BOWLES, K. L.: *Problem-Solving using Pascal,* Berlín, Springer-Verlag, 1977.

13. CAIRNS-SMITH, A. G.: *Genetic Takeover,* Cambridge, Cambridge University Press, 1982.
14. CAIRNS-SMITH, A. G.: *Seven Clues to the Origin of Life,* Cambridge, Cambridge University Press, 1985.
15. CAVALLI-SFORZA, L. y M. FELDMAN: *Cultural Transmission and Evolution,* Princeton, N. J., Princeton University Press, 1981.
16. COTT, H. B.: *Adaptive Coloration in Animals,* Londres, Methuen, 1940.
17. CRICK, F.: *Life Itself,* Londres, Macdonald, 1981.
18. DARWIN, C.: *The Origin of Species,* Londres, Penguin, 1859 (reimpr.). (Trad. esp.: *El origen de las especies,* Barcelona, Ediciones del Serbal, 1983.)
19. DAWKINS, M. S.: *Unravelling Animal Behaviour,* Londres, Longman, 1986.
20. DAWKINS, R.: *The Selfish Gene,* Oxford, Oxford University Press, 1976. (Trad. esp.: *El gen egoísta,* Barcelona, Labor, 1979.)
21. DAWKINS, R.: *The Extended Phenotype,* Oxford, Oxford University Press, 1982.
22. DAWKINS, R.: «Universal Darwinism», en BENDALL, D. S. (ed.), *Evolution from Molecules to Men,* Cambridge, Cambridge University Press, 1982, pp. 403-425.
23. DAWKINS, R. y J. R. KREBS: «Arms races between and within species», *Proceedings of the Royal Society of London,* B, 205 (1979), 489-511.
24. DOUGLAS, A. M.: «Tigers in Western Australia», *New Scientist,* 110 (1505) (1986), 44-47.
25. DOVER, G. A.: *Improbable adaptations and Maynard Smith's dilemma,* manuscrito no editado, dos lecturas públicas, Oxford, 1984.
26. DYSON, F.: *Origins of Life,* Cambridge, Cambridge University Press, 1985.
27. EIGEN, M., W. GARDINER, P., SCHUSTER y WINKLER-OSWATITSCH: «The origin of genetic information», *Scientific American,* 244 (4) (1981), 88-118.
28. EISNER, T.: «Spray aiming in bombardier beetles: jet deflection by the Coander Effect», *Science,* 215 (1982), 83-85.
29. ELDREDGE, N.: *Time Frames: the rethinking of Darwinian evolution and the theory of punctuated equilibria,* Nueva York, Simon & Schuster, 1985. (Incluye el escrito de Eldredge y Gould.)
30. ELDREDGE, N.: *Unfinished Synthesis: biological hierarchies and modern evolutionary thought,* Nueva York, Oxford University Press, 1985.

31. FISHER, R. A.: *The Genetical Theory of Natural Selection,* Oxford, Clarendon Press, 2.ª ed. en rústica, Nueva York, Dover Publications, 1930.
32. GILLESPIE, N. C.: *Charles Darwin and the Problem of Creation,* Chicago, University of Chicago Press, 1979.
33. GOLDSCHMIDT, R. B.: «Mimetic polymorphism, a controversial chapter of Darwinism», *Quarterly Review of Biology,* 20 (1945), 147-164 y 205-230.
34. GOULD, S. J.: *The Panda's Thumb,* Nueva York, W. W. Norton, 1980. *(Trad.* esp.: *El pulgar del panda,* 3.ª edición, Barcelona, Orbis, 1986.)
35. GOULD, S. J.: «Is a new and general theory of evolution emerging?», *Paleobiology,* 6 (1980), 119-130.
36. GOULD, S. J.: «The meaning of punctuated equilibrium, and its role in validating a hierarchical approach to macroevolution», en MILKMAN, R. (ed.), *Perspectives on Evolution,* Sunderland, Mass., Sinauer, pp. 83-104.
37. GRIBBIN, J. y J. CHERFAS: *The Monkey Puzzle,* Londres, Bodley Head, 1982.
38. GRIFFIN, D. R.: *Listening in the Dark,* New Haven, Yale University Press, 1958.
39. HALLAM, A.: *A Revolution in the Earth Sciences,* Oxford, Oxford University Press, 1973.
40. HAMILTON, W. D. y M. ZUK: «Heritable true fitness and bright birds: a role for parasites?», *Science,* 218 (1982) 384-387.
41. HITCHING, F.: *The Neck of the Giraffe, or Where Darwin Went Wrong,* Londres, Pan, 1982.
42. HO, M.-W. y P. SAUNDERS: *Beyond Neo-Darwinism,* Londres, Academic Press, 1984.
43. HOYLE, F. y N. C. WICKRAMASINGHE: *Evolution from Space,* Londres, J. M. Dent, 1981.
44. HULL, D. L.: *Darwin and his Critics,* Chicago, Chicago University Press, 1973.
45. JACOB, F.: *The Possible and the Actual,* Nueva York, Pantheon, 1982.
46. JERISON, H. J.: «Issues in brain evolution», en DAWKINS, R. y M. RIDLEY (eds.), *Oxford Surveys in Evolutionary Biology,* 2 (1985), 102-134.
47. KIMURA, M.: *The Neutral Theory of Molecular Evolution,* Cambridge, Cambridge University Press, 1982.
48. KITCHER, P.: *Abusing Science: the case against creationism,* Milton Keynes, Open University Press, 1983.
49. LAND, M. F.: Optics and vision in invertebrates», en AUTRUM, H. (ed.), *Handbook of Sensory Physiology,* Berlín, Springer, 1980, pp. 471-592.

50. LANDE, R.: «Sexual dimorphism, sexual selection, and adaptation in polygenic characters», *Evolution,* 34 (1980), 292-305.
51. LANDE, R.: «Models of speciation by sexual selection of polygenic traits», *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 78 (1981), 3721-3725.
52. LEIGH, E. G.: «How does selection reconcile individual advantage with the good of the group?», *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 74 (1977), 4542-4546.
53. LEWONTIN, R. C. y LEVINS, R.: «The Problem of Lysenkoism», en ROSE, H. y S. ROSE (eds.), *The Radicalization of Science,* Londres, Macmillan, 1976.
54. MACKIE, J. L.: *The Miracle of Theism,* Oxford, Clarendon Press, 1982.
55. MARGULIS, L.: *Symbiosis in Cell Evolution,* San Francisco, W. H. Freeman, 1981.
56. MAYNARD SMITH, J.: «Current controversies in evolutionary biology», en GRENE, M. (ed.), *Dimensions of Darwinism,* Cambridge, Cambridge University Press, 1983, pp. 273-286.
57. MAYNARD SMITH, J.: *The Problems of Biology,* Oxford, Oxford University Press, 1986.
58. MAYNARD SMITH, J. *et al.*: «Developmental constraints and evolution», *Quarterly Review of Biology,* 60 (1986), 265-287.
59. MAYR, E.: *Animal Species and Evolution,* Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1963.
60. MAYR, E.: *Principles of Systematic Zoology,* Nueva York, McGraw-Hill, 1969.
61. MAYR, E.: *The Growth of Biological Thought,* Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1982.
62. MONOD, J.: *Chance and Necessity,* Londres, Fontana, 1972. (Trad. esp.: *El azar y la necesidad,* 2.ª edición, Barcelona, Orbis, 1987.)
63. MONTEFIORE, H.: *The Probability of God,* Londres, SCM Press, 1985.
64. MORRISON, P., P. MORRISON, C. EAMES y R. EAMES: *Powers of Ten,* Nueva York, Scientific American, 1982. (Trad. esp.: *Potencias de diez,* 2.ª edición, Barcelona, Prensa Científica, 1984.)
65. NAGEL, T.: «(What is it like to be a bat?», *Philosophical Review,* reimpreso en HOFSTADTER, D. R. y D. C. DENNETT (eds.), *The Mind's I,* Brighton, Harvester Press, 1974, pp. 391-403.
66. NELKIN, D.: «The science textbook controversies», *Scientific American,* 234 (4) (1976), 33-39.
67. NELSON, G. y N. I. PLATNICK: «Systematics and evolution», en HO, M.-W. y P. SAUNDERS (eds.), *Beyond Neo-Darwinism,* Londres, Academic Press, 1984.

68. O'DONALD, P.: «Sexual selection by female choice», en BATESON, P. P. G. (ed.), *Mate Choice,* Cambridge, Cambridge University Press, 1983, pp. 53-66.
69. ORGEL, L. E.: *The Origins of Life,* Nueva York, Wiley, 1973. (Trad. esp.: *Los orígenes de la vida,* 3.ª edición, Madrid, Alianza, 1984.)
70. ORGEL, L. E.: «Selection in vitro», *Proceedings of the Royal Society of London,* B, 205 (1979), 435-442.
71. PALEY, W.: *Natural Theology,* 2.ª edición, Oxford, J. Vincent, 1828.
72. PENNEY, D., L. R. FOULDS y M. D. HENDY: «Testing the theory of evolution by comparing phylogenetic trees constructed from five different protein sequences», *Nature,* 297 (1982), 197-200.
73. RIDLEY, M.: «Coadaptation and the inadequacy of natural selekoon», *British Journal for the History of Science,* 15 (1982), 45-68.
74. RIDLEY, M.: *The Problems of Evolution,* Oxford, Oxford University Press, 1986. (Trad. esp.: *La evolución y sus problemas,* Madrid, Pirámide, 1987.)
75. RIDLEY, M.: *Evolution and Classification: the reformation of cladism,* Londres, Longman, 1986.
76. RUSE, M.: *Darwinism Defended,* Londres, Addison-Wesley, 1982.
77. SALES, G. y D. PYE: *Ultrasonic Communication by Animals,* Londres, Chapman & Hall, 1974.
78. SIMPSON, G. G.: *Splendid Isolation,* New Haven, Yale University Press, 1980.
79. SINGER, P.: *Animal Liberation,* Londres, Cape, 1976.
80. SMITH, J. L. B.: *Old Fourlegs: the story of the Coelacanth,* Londres, Longmans, Green, 1956.
81. SNEATH, P. H. A. y R. R. SOKAL: *Numerical Taxonomy,* San Francisco, W. H. Freeman, 1973.
82. SPIEGELMAN, S.: «An *in vitro* analysis of a replicating molecule», *American Scientist,* 55 (1967), 63-68.
83. STEBBINS, G. L.: *Darwin to DNA, Molecules to Humanity,* San Francisco, W. H. Freeman, 1982.
84. THOMPSON, S. P.: *Calculus Made Easy,* Londres, Macmillan, 1910.
85. TRIVERS, R. L.: *Social Evolution,* Menlo Park, Benjamin-Cummings, 1985.
86. TURNER, J. R. G.: «"The hypothesis that explains mimetic resemblance explains evolution": the gradualist-saltationist schism», en GRENE, M. (ed.), *Dimensions of Darwinism,* Cambridge, Cambridge University Press, 1983, pp. 129-169.

87. VAN VALEN, L.: «A new evolutionary law», *Evolutionary Theory,* 1 (1973), 1-30.
88. WATSON, J. D.: *Molecular Biology of the Gene,* Menlo Park, Benjamin-Cummings, 1976. (Trad. esp.: *Biología molecular,* Madrid, Aguilar, 1978.)
89. WILLIAMS, G. C.: *Adaptation and Natural Selection,* Nueva Jersey, Princeton University Press, 1966.
90. WILSON, E. O.: *The Insect Societies,* Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1971.
91. WILSON, E. O.: *Biophilia,* Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1984.
92. YOUNG, J. Z.: *The Life of Vertebrates,* Oxford, Clarendon Press, 1950. (Trad. esp.: *La vida de los vertebrados,* Barcelona, Omega, 1985.)

ÍNDICE

PREFACIO 15

. Explicar lo muy improbable 21
. Un buen diseño 41
. Acumular pequeños cambios 65
. Trazar sendas a través del espacio animal . . . 100
. El poder y los archivos 138
. Orígenes y milagros 168
. La evolución constructiva 200
. Explosiones y espirales 228
. Desbaratar las interrupciones 258
. El verdadero árbol de la vida 291
. Rivales predestinados 325

BIBLIOGRAFÍA 361